

平面 굽힘 疲勞荷重에 의한 알루미늄 합금材의
모서리 균열 傳播學動에 관한 研究

金 永 植* · 金 英 鍾**

An Investigation of the Behavior in the Corner Crack Propagation
of Al-Alloy by the Plane Bending Fatigue

Young Sik Kim · Young Jong Kim

Abstract

The 5086-H116 Al-Alloy plate specimens having an edge through-thickness notch were investigated to find out the characteristics of the corner crack propagation by the plane bending fatigue.

The experiments were also carried out in order to clarify the change of the corner crack propagation behaviour due to the various materials and their thicknesses.

In addition, the retardation effect of overload on the corner crack propagation was quantitatively studied.

Main results obtained are as follows;

1. In the case of estimating the crack propagation rate of the corner crack, it is more reasonable to consider the growth rate of fracture surface area than that of crack length.
2. The shape of the corner crack growing in the plane plate under the bending fatigue can be estimated as following equation.

$$\frac{b}{a} = 1 - \frac{b}{t}$$

where

a : crack length

b : crack depth

t : specimen thickness

* 正會員 韓國海洋大學

** 正會員 浦項實業專門大學

3. The crack propagation rate increases with the increasing of the thickness and the decreasing of the Young's modulus of materials.
4. Regardless of a thickness and kind of materials of specimen, the characteristics of the corner crack propagation can be concluded as following equation.

$$\frac{da_E}{dn} = C \left(\frac{\Delta K}{E} \right)^n$$

$$C \doteq 2.6 \times 10^{-8}$$

$$n \doteq 2.44$$

where

$\frac{da_E}{dn}$: equivalent crack propagation rate

$\frac{\Delta K}{E}$: strain intensity factor range.

5. The retardation effect of overload is distinct in the corner crack propagation.

記號說明

ΔK : 應力強度係數範圍 (Stress intensity factor range) (kg/mm ^{3/2})	ΔK_o : 過負荷 應力強度係數範圍 (Overload stress intensity factor range) (kg/mm ^{3/2})
ΔS_o : 公稱應力範圍 (Nominal stress range) (kg/mm ²)	σ_y : 항복應力 (Yield stress) (kg/mm ²)
a : 균열 길이 (Crack length) (mm)	r_{pi} : i 번째 cycle의 塑性領域의 크기 (ith cycle's plastic zone size) (mm)
b : 균열 깊이 (Crack depth) (mm)	ΔS_i : i 번째 cycle의 應力範圍 (ith cycle's stress range) (kg/mm ²)
S : 破面面積 (Fracture surface area) (mm ²)	ΔK_i : i 번째 cycle의 應力強度係數範圍 (ith cycle's stress intensity factor range) (kg/mm ^{3/2})
$\frac{da}{dn}$: 균열 길이 成長速度 (Crack length propagation rate) (mm/cycle)	$\frac{\Delta K}{E}$: 變形率強度係數範圍 (Strain intensity factor range, $\frac{1}{2} \Delta \epsilon, \sqrt{\pi a}$) (mm ^{1/2})
$\frac{ds}{dn}$: 破面面積 成長速度 (Fracture surface area growth rate) (mm ² /cycle)	a_E : 相當 균열 길이 (Equivalent crack length) (mm)
b/a : 形狀比 (Aspect ratio)	$\frac{da_E}{dn}$: 相當 균열 길이 傳播速度 (Equivalent crack length propagation rate) (mm/cycle)
E : 彈性係數 (Young's modulus) (kg/mm ²)	Δa_E : 相當 균열 길이 增分 (Equivalent crack length increment) (mm)
$\Delta \epsilon_i$: 變形率範圍 (Strain range)	ϕ : 減速 매개 變數 (Retardation parameter)
r_{po} : 過負荷後 塑性域의 크기 (Plastic zone size after overload) (mm)	
ΔS_o : 過負荷의 應力範圍 (Overload stress range) (kg/mm ²)	

1. 序 論

船舶, 航空機, 橋梁 등의 大形 構造物 및 各種 機械 또는 壓力容器 등의 安全性 確保를 위한 設計에 있어서, 가장 重要한 問題는 이들 構造物의 疲勞破壞를 如何히 防止하느냐 하는 問題라 할 수 있다. 이러한 問題를 解決하기 위해서는, 構造物 内部에 存在하는 各種 應力集中部나 欠陷으로부터의 疲勞균열 發生機構가 解明되어야 하는 동시에, 일단 發生한 疲勞균열의 傳播舉動이 正確히 규명 되어야 하며, 이를 基礎로 構造物의 形狀이나 使用環境에 따른 使用수명을 예측할 수 있어야 할 것이다.¹⁾²⁾

이러한 必要性에 의하여 疲勞균열의 發生 및 傳播에 관한 研究는 오래 전부터 活潑히 行하여져왔고,²⁻⁹⁾ 특히 最近들어 電子顯微鏡의 開發에 힘입어, 各種 疲勞균열의 微視的 機構가 차츰 밝혀지고 있는 것은 刮目할만한 事實이다.¹⁰⁻¹²⁾

그러나 이들의 研究는 主로 鐵鋼材料를 中心으로 하여 通常의 引張, 壓縮 荷重에 의한 貫通 疲勞 균열(Through fatigue crack)의 發生 및 傳播에 局限한 것으로 船舶, 航空機, 橋梁 등, 大型 構造物의 疲勞破壞에 있어서, 더욱 重要하다고 생각되는 平面 굽힘 反復荷重에 의한 表面 균열(Surface crack or Part through crack)의 發生과 傳播에 관한 研究는 몇 편의 研究結果에도 불구하고 그 舉動이 충분히 밝혀져 있지 않다.⁶⁾¹³⁾¹⁴⁾

이러한 平面 굽힘 反復荷重에 의한 表面균열(Surface crack)은 降伏點(Yield point)보다 낮은 使用荷重下에서도 構造物의 熔接時에 수반되는 各種 熔接균열이나, 氣孔(Void), 介在物(Inclusion) 등 部材内部의 各種 欠陷, 또는 部材의 形狀不連續部 등과 같은 應力集中部를 起點으로 發生하여 臨界균열 길이(Critical crack length)에 이르게 되면, 순식간에 構造物 全體의 破斷을 초래하게 된다.

이러한 表面균열(Surface crack)은 그 形狀에 따라 半圓形균열(Semicircular crack), 半橢圓形(Semielliptical crack), 四分圓形(Quarter circular crack), 四分橢圓形(Quarter elliptical crack) 등으로 細分되며, 이 중에서 특히 四分

橢圓形 狀態로 傳播하는 모서리 균열(Corner crack)은 그것이 進展함에 따라 그 形狀變化가 현저하게 나타난다.¹⁵⁾ 따라서 모서리 균열(Corner crack)의 進展에 따른 形狀變化는 表面균열을 가진 部材의 疲勞균열 傳播特性을 究明하는 데 매우 重要한 要素라 할 수 있다.

各種 表面균열의 成長舉動에 대해서는 Irwin,³⁾ Rice,⁴⁾ Kawahara,⁶⁾ Mukai,¹⁴⁾ Kote-razawa⁷⁾ 등의 報告가 있으나 특히 균열 進展에 따라 그 形狀變化가 현저히 나타나는 모서리 균열의 傳播舉動 및 形狀變化에 대해서는 충분히 밝혀져 있지 않다.

Kawahara,⁶⁾ 金¹⁶⁾ 등은 이와 같은 모서리 균열의 경우, 균열 깊이(Crack depth)를 고려하지 않은 通常의 균열 길이(Crack length)만의 表面균열 傳播速度(Surface crack propagation rate) da/dn 와 應力強度係數範圍(Stress intensity factor range) ΔK 와의 相關關係에 의해 그 進展特性을 一意的으로 評價하는 데는 問題가 있음을 指摘하였다.

本 研究에서는 以上과 같은 結果를 토대로 모서리 균열(Corner crack)의 進展에 따른 形狀變化를 定量的으로 究明하고 그 進展特性을 評價하는 새로운 方法을 確立하며, 過負荷(Overload)에 의한 균열 進展速度의 減速効果(Retardation effect)를 檢討함과 아울러, 最近 小形 高速船舶의 外板材料로 使用되는 5086-H116 알루미늄 합금材의 균열 進展特性을 考察할 것을 目的으로, 自作한 平面 굽힘 疲勞試驗機에 의한 片振平面 굽힘 疲勞試驗을 行하였다.

2. 實驗 方法

2.1 試驗材 및 試驗片

本 實驗에서는 試驗材로서 5086-H116 알루미늄 합금材를, 比較材로서는 SS-41軟鋼材의 두 種類로 하였다. 그 化學的 成分 및 機械의 特性은 Table 1. 과 같다. 알루미늄 합금材의 板두께는 4.5, 6, 6.6, 8, 10, 12.5mm의 6種類로 變化시켜 두께에 따른 균열 進展特性과 形狀變化를 比較 考察하였으며, 比較材인 軟鋼材에 대해서는 8mm, 10mm 두 種類의 두께에 대해서

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of materials

Materials	Chemical compositions (wt%)											Mechanical properties		
	Mn	Cr	Cu	Mg	Si	Ti	C	P	S	Fe	Al	T.S kg/mm ²	Y.S kg/mm ²	El. %
5086-H116 Al-Alloy	0.36	0.132	0.02	3.7	0.05	0.015	—	—	—	0.27	Res.	42	30	12
SS-41	0.54	—	—	—	0.22	—	0.19	0.02	0.015	Res.	—	43	31	28

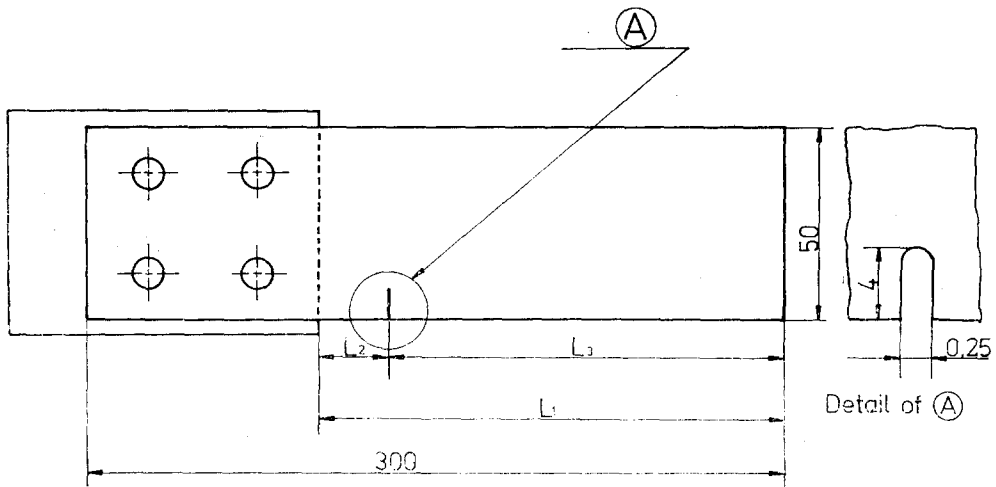


Fig.1 Configuration and dimensions of specimens

實驗을 行하였다.

이 두 種類의 試驗片은 壓延方向을 길이 方向과 一致시켜, Fig.1과 같은 치수로 機械加工을 하였고, 또 軟鋼材만은 별도로 研削加工한 두께를, 알루미늄 合金材는 固有의 두께를 최고 #2,000까지의 사포(Sand paper)로 研磨加工하였다. 各 試驗片은 0.25mm 슬로팅 커터(Slotting cutter)를 사용하여 片側貫通 노치(Notch)를 加工하였다. 片側貫通 노치의 形狀은 Fig.1과 같다.

2.2 實驗裝置 및 實驗方法

本 研究室에서 創案 製作하여 이 實驗에 使用한 片心輪式 定變位 平面 굽힘 疲勞試驗機의 原理는 Fig.2와 같고, 그 外觀은 Photo 1에 表示한다. 板狀 試驗片의 一端은 덜개를 덮어 볼트로 固定하고 自由端은 片心輪의 回轉에 의하여 平面 굽힘 反復荷重을 받게 하였다. 이 片心輪의

外周에는 볼베어링을 끼워서 試驗片과의 사이에 磨擦을 피할 수 있도록 하였고, 試驗片은 同時에 3個까지 裝着할 수 있도록 하였다. 그리고 Fig.1에 나타낸 片心輪의 片心量, 固定端과 荷重點과의 길이(L₁) 및 固定端과 노치와의 길이(L₂)를 變化시킴으로서 應力을 미세하게 調節할 수 있도록 하였다.

荷重反復의 回轉數測定에는 펄스(Pulse)式 센서(Sensor)와 電子積算回轉計(Digital integration counter)를 利用한 回轉數 測定器(Counter unit)를 製作하여 10⁹회까지 精密하게 測定하였다.

균열 成長길이(Crack growth length)는 一定한 反復荷重을 加한 후 移送顯微鏡(Travelling or Reading microscope)을 利用하여 0.01 mm까지 測定하였다.

이 實驗에 使用한 應力의 各形態는 Fig.3 및 Fig.4에 表示한 바와 같이 應力比 R=0인 片振 應力이며, 또 反復荷重의 速度는 모두 600cpm

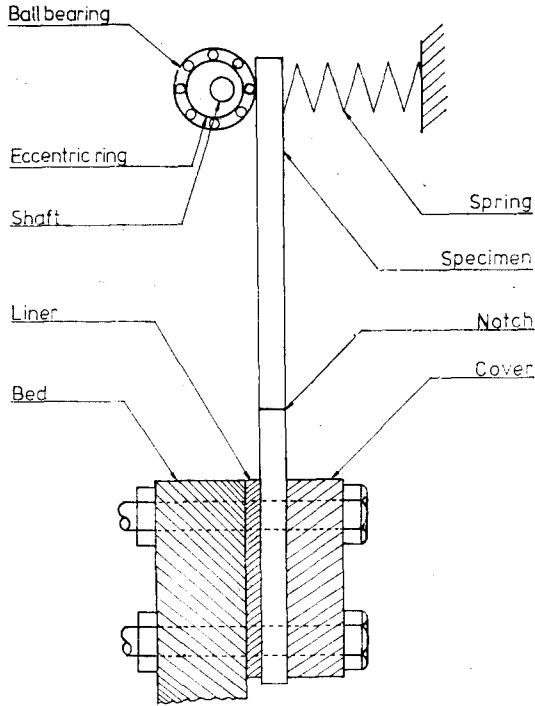
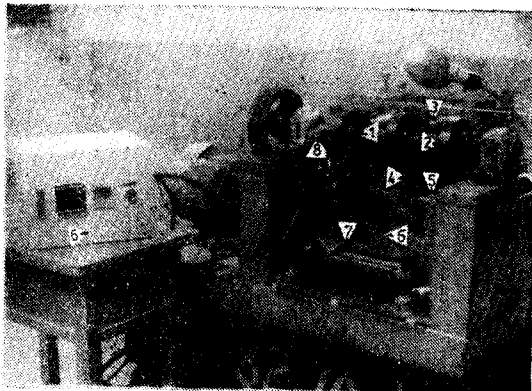


Fig. 2 Schematic diagram of the bending fatigue tester



- | | |
|-------------------|-------------------------------------|
| 1. Eccentric Ring | 6. Bed |
| 2. Ball Bearing | 7. Travelling or Reading Microscope |
| 3. Spring | 8. Sensor |
| 4. Specimen | 9. Counter Unit |
| 5. Cover | |

Photo 1. General view of the bending fatigue tester

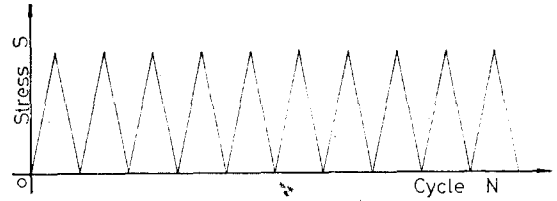


Fig. 3 Stress pattern for measurement of crack propagation rate in fatigue test

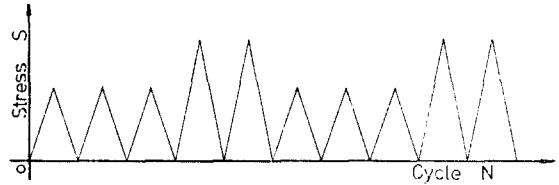


Fig. 4 Stress pattern for observation of fracture surface in fatigue test

으로 하였다. 여기서 Fig. 4의 2段片振 平面 굽힘 應力形態를 利用하여 破面에 비이치 마크 (Beach mark)를 만들어 모서리 균열의 形狀變化를 連續的으로 觀察하였고, 또한 이로써 過負荷의 影響을 檢討하였다.

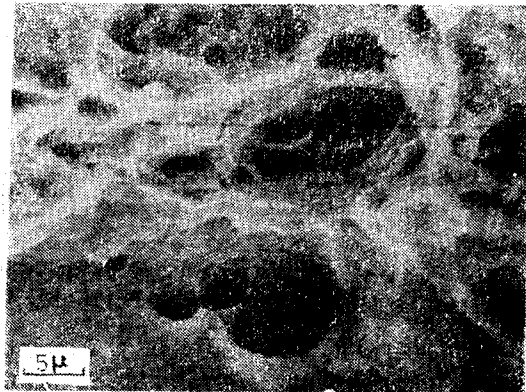
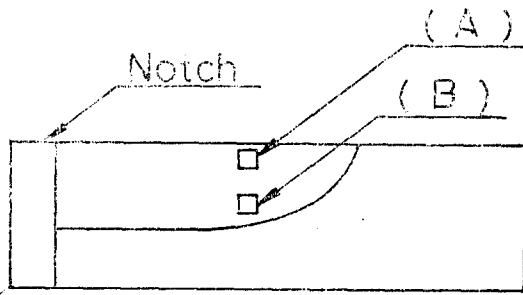
微視的 進展舉動은 走査型 電子顯微鏡에 의한 破面 觀察을 통해 調査하였다.

3. 實驗結果 및 考察

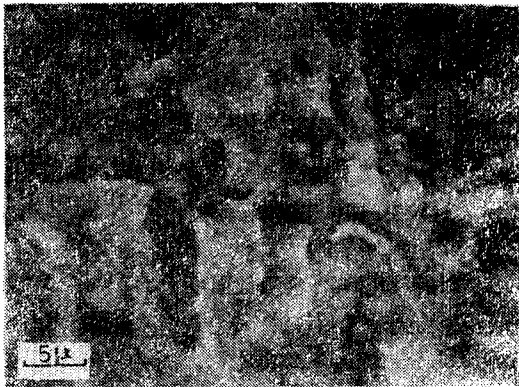
3.1 모서리 균열의 傳播特性

SS-41 軟鋼材의 疲勞破面에 대하여 走査型 電子顯微鏡을 使用하여 촬영한 破面사진(fractograph)은 Photo 2와 같이, 이에 의하면 모서리 균열은 두께 방향의 깊이에 따라 그 破面樣相이 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉, 板 두께의 表面部 및 中央部에 있어서는 疲勞破面의 特徵인 스트라이에이션(Striation)이 不規則하게 나타나 있으나 균열 下部에 있어서는 스트라이에이션보다도 延性破面의 特徵인 덤플(Dimple)이 많이 나타나 있음을 알 수 있다.¹⁷⁾ 따라서 板두께의 表面部와 中央部 및 下部에서는 別個의 傳播機構에 의해 균열이 進展되는 것이 觀察된다.

모서리 균열의 경우, 이와 같이 균열 低部에



(A)



(B)

Photo 2. Fractographs of corner fatigue crack(SS-41)

서 延性破面을 나타나는 것은 다음과 같이 생각된다. 즉, 모서리 균열이 발생되면 그 傳播의 初期에는 거의 같은 速度로 板表面과 두께 方向으로 進展되나, 一定 크기에 到達한 후에는 두께 方向의 깊이는 거의 停滯되고 板表面의 균열 길이만이 進展되나, 일단 板表面 균열 길이가 一定 길이 만큼 成長한 후에는 어느 순간에 두

께 方向의 깊이는 延性的으로 一定 길이 만큼 점프(Jump)하는 것으로 思料된다.

따라서 板의 表面部와 中央部에서는 疲勞破壞가, 또 低部에서는 間歇的인 延性破壞가 균열 進展을 가져오는 것으로 생각된다.

板의 表面部와 中央部에서 스트라이에이션이 形成되면서 成長하는 疲勞균열의 傳播機構를 Fig.5에 나타낸다. 最初에 發生한 疲勞균열 先端의 應力集中部를 起點으로 하여 最大 剪斷應力 方向을 따라 1,2 段처럼 슬립(Slip)이 일어난다. 이 슬립으로 인하여 균열은 開口(Opening)되어 成長하면서, 3 段에서처럼 또 다른 슬립면(Slip plane)이 나타나며 加工硬化와 應力增加로 또 다른 슬립면을 일으키면서 4 段에서처럼 균열 先端이 무디게 된다. 따라서 균열은 Δa 만큼 成長을 초래한다. 塑性變形은 균열 先端 주위에 形成되어 彈性領域으로 둘러싸이고 荷重이 除去되면서 壓縮塑性領域(Compressed plastic deformation)이 形成된다. 이 結果, Fig.5의

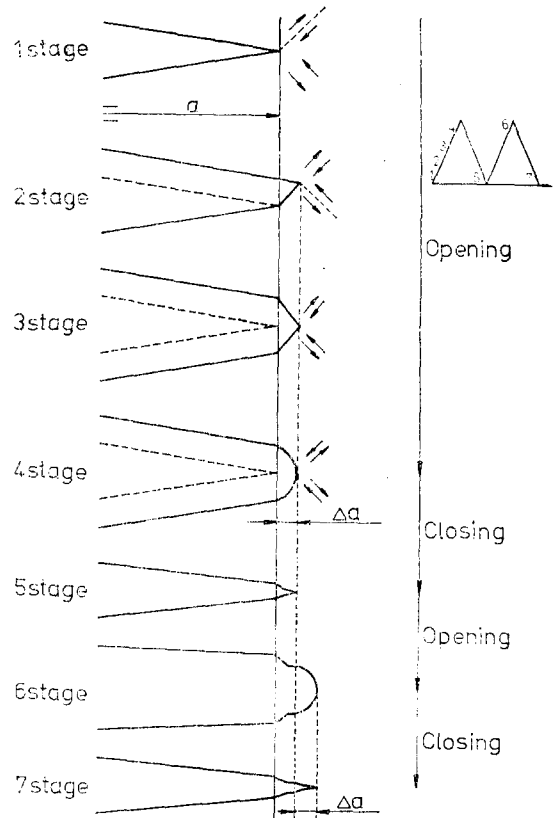
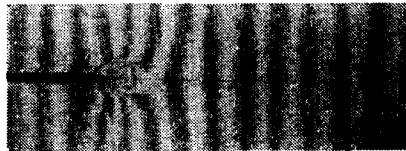


Fig.5 A model for fatigue crack growth

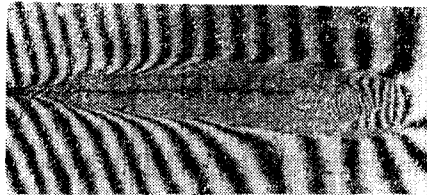
5 段에서 나타난 바와 같이 균열 先端이 닫혀지면서 날카로운(Sharpening) 形狀을 이룬다. 이와 같은 균열의 開口(Opening or Blunting)와 閉口(Closing or Sharpening)의 反復으로 每回마다 典型的인 리플 패턴(Ripple patten)으로 스트라이에이션이 形成된다.¹⁸⁾

Photo 3은 균열 進展과 더불어 균열 주변과 균열 先端에서 形成된 塑性領域을 光干涉法(Optical interference method)에 의하여 촬영한 것으로 균열 進展길이 增加함에 따라 塑性領域의 증가 현상을 나타내고 있다.

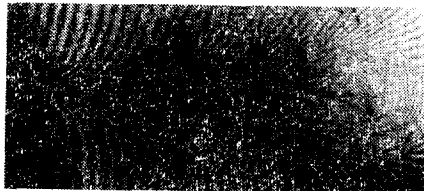
一般적으로 疲勞균열 傳播特性은 균열 길이만의 成長速度인 da/dn 와 應力強度係數範圍인 ΔK 와의 相關關係에 의해 評價된다.



$\Delta K = 22 \text{ kg/mm}^{3/2}$



$\Delta K = 100 \text{ kg/mm}^{3/2}$



$\Delta K = 115 \text{ kg/mm}^{3/2}$

Photo 3. Plastic zone behaviour near the propagating crack in SS-41 steel

Fig. 6은 本 實驗에서 求한 알루미늄 합금材에 대한 $da/dn - \Delta K$ 의 關係를 兩對數座標에 表示한 것이며, 여기서 應力強度係數範圍 ΔK 는 Kawahara 등이 提示한 式(1)을 引用한 것이다.⁶⁾

$$\Delta K = \frac{1}{2} \Delta S_b \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서 ΔS_b : 應力振幅(Stress amplitude)

(kg/mm^2)

a : 균열길이(Crack length) (mm)

이 結果에 의하면 모서리 균열의 경우는 Paris rule에 입각한 $da/dn - \Delta K$ 의 相關關係에 의해 그 進展特性은 兩對數座標上에서 一次式으로 表示할 수 없음을 알 수 있다.

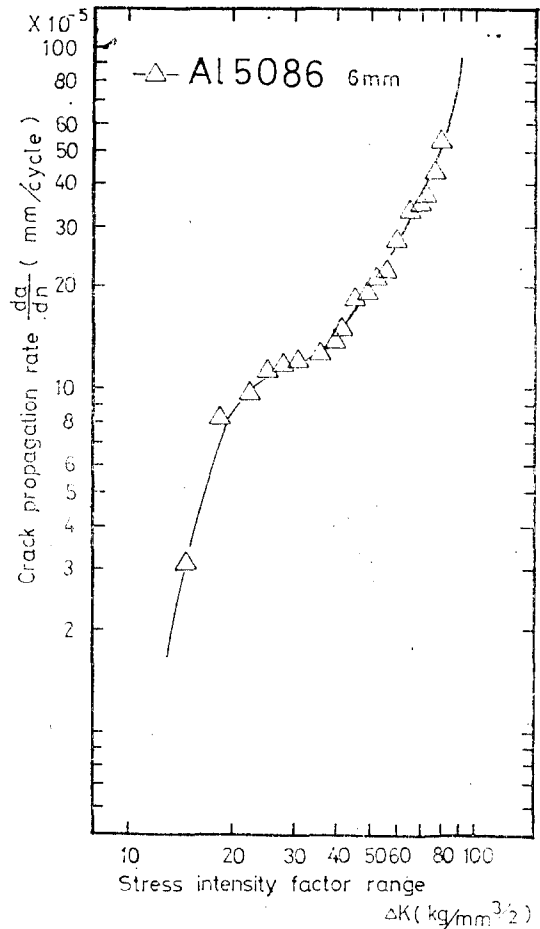


Fig. 6 Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate

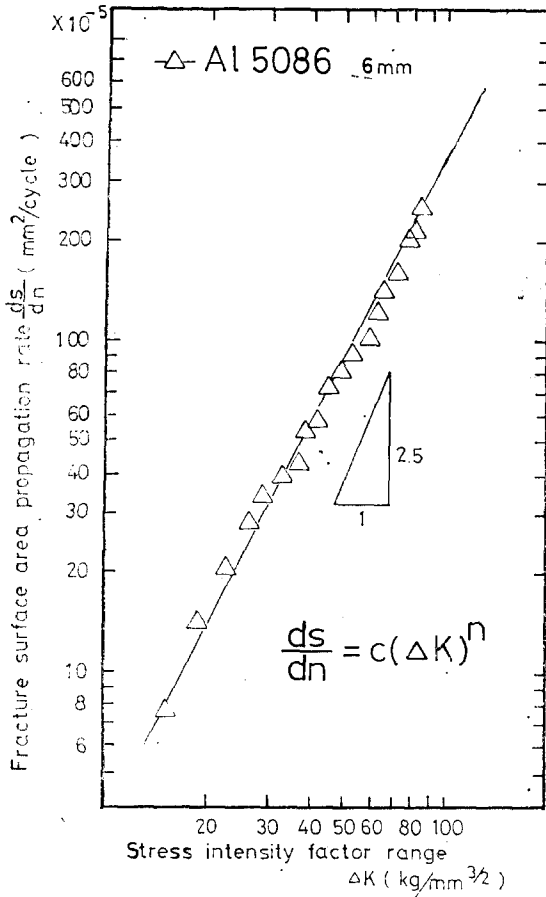


Fig. 7 Relation between stress intensity factor range and fracture surface propagation rate

Fig. 7은 같은 實驗結果를 破面面積成長速度 ds/dn 와 應力強度係數範圍 ΔK 와의 相關關係에 의해 整理한 것이다. 여기서 모서리 균열의 破面形狀은 Fig. 8과 같이 四分橢圓形이므로, 균열 길이 a 와 균열깊이 b 와의 關係를 利用하여 破面의 面積을 구하면 다음과 같다.

$$S = \frac{1}{4} \pi a b \quad (2)$$

여기서 a : 균열길이(Crack length)
 b : 균열깊이(Crack depth)

以上, Fig. 7의 $ds/dn - \Delta K$ 와의 相關關係는 兩對數座標上에서 좋은 直線으로 表示할 수 있을 것을 알 수 있다.

一般的인 貫通균열의 경우는 $da/dn - \Delta K$ 의 相

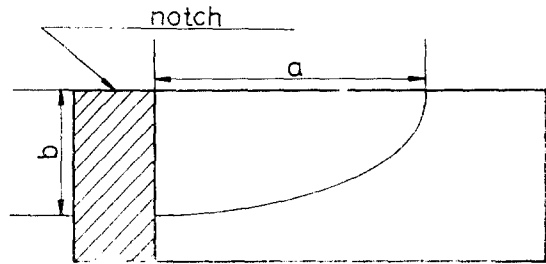
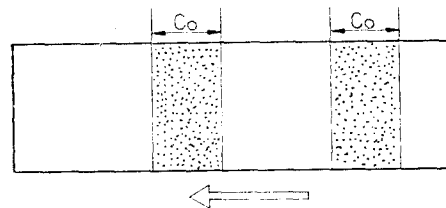
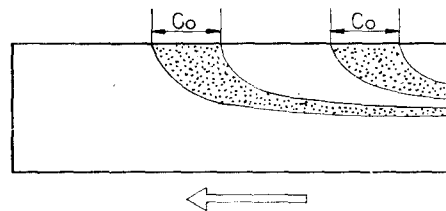


Fig. 8 Quarter elliptical corner crack



(A) Through crack



(B) Part through crack

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

關關係에 의해 그 進展特性이 잘 評價되나 모서리 균열의 경우는 以上과 같이 $da/dn - \Delta K$ 의 相關關係보다는 $ds/dn - \Delta K$ 의 相關關係가 더 좋은 直線性을 보이는 것은 다음과 같이 考察된다.

Fig. 9의 (A), (B)는 貫通균열과 非貫通 균열 또는 表面균열의 傳播에 따른 破面成長을 比較하기 위한 것으로서 下部의 화살표는 균열 傳播方向을 나타낸다. 初期에 있어서 균열의 길이 Co 만큼 傳播하였을 때와 一定 길이 傳播한 후 같은 길이 Co 만큼 傳播하였을 때의, 增加된 破面面積을 比較해 보면, (A)의 貫通균열인 경우는 破面增加가 一定하나, (B)의 모서리 균열인 경우에는 균열의 成長과 더불어 增加된 破面の

面積은 일정치 않음을 알 수 있다.

따라서 斷面減少率의 견지에서 생각하면, 非貫通表面균열을 가진 材料의 疲勞균열 傳播特性을 評價함에 있어서는 ΔK 에 대한 破面面積成長速度 ds/dn 의 關係를 利用하는 것이 타당하다고 思料된다.¹⁶⁾

3.2 모서리 균열의 形狀變化

Photo 4는 6, 8mm 및 10mm 두께의 5086-H116 알루미늄 합금材 試驗片에 대하여 片側貫通 노치로 부터 發生傳播한 모서리 균열의 巨視的 破面の 樣相과 비이치 마크를 나타낸 것이다. 이에 의하면 모서리 균열의 發生 初期에는 板表面에 나타난 균열 길이와 두께 方向에 나타난 균열 깊이는 거의 같거나, 균열 깊이가 더

크게 나타나나, 균열이 成長함에 따라 板表面에 나타난 균열 길이가 균열 깊이에 비해 현저하게 커지고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 균열 形狀變化를 具體적으로 考察하기 위해 균열 길이 a 와 균열 깊이 b 와의 比인 形狀比 (Aspect ratio) b/a 의 값과 균열 깊이 b 와 試驗片 두께 t 와의 比 b/t 의 값과의 關係를 나타내면 Fig. 10과 같다. 이 結果에 의하면 10mm 두께 試驗片의 균열 發生初期를 제외하고 3種類의 試驗片 다같이 一意的으로 모서리 균열의 形狀變化를 評價할 수 있음을 나타내고 있다.

이러한 結果로부터 균열의 形狀比 b/a 와 b/t 와의 關係를 구해 보면 式(3)과 같다.⁶⁾¹⁴⁾

$$\frac{b}{a} = 1 - \frac{b}{t} \quad (3)$$

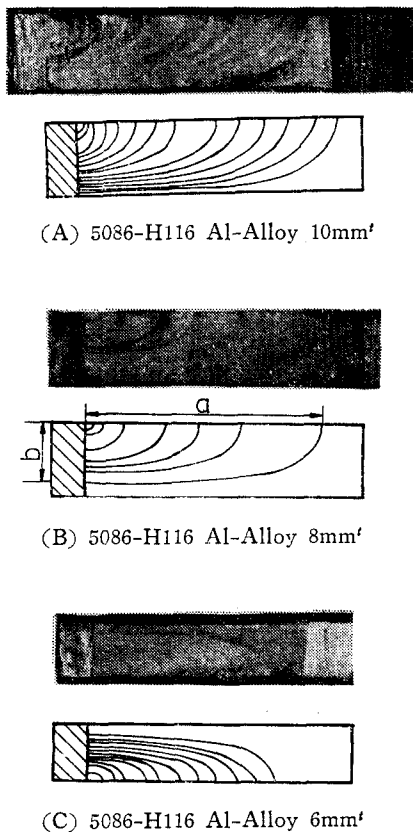


Photo 4. Macrographs and beach marks of fracture surface

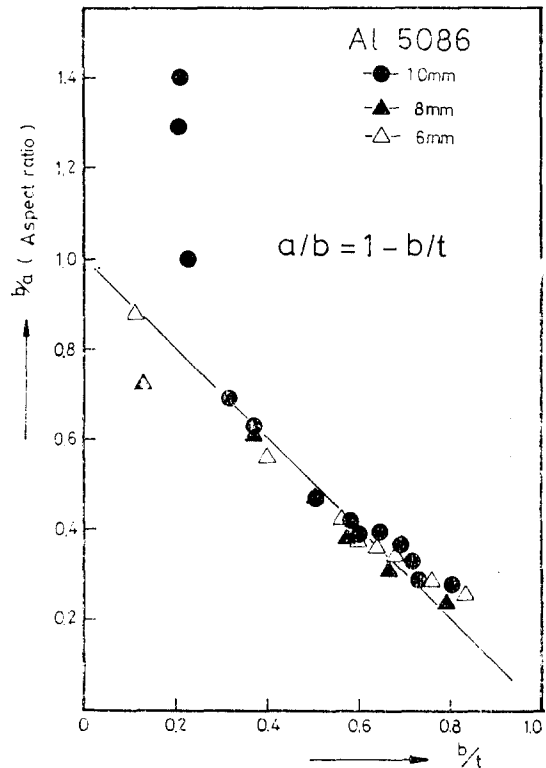


Fig. 10 Shape changes of corner fatigue crack

3.3 板두께 및 材質의 變化에 따른 傳播 舉動

5086-H116 알루미늄 合金材의 두께 4.5, 6, 6.6, 8, 10mm 및 12.5mm, 그리고 SS-41 軟鋼材의 두께 8mm, 10mm에 대해 균열 傳播速度 da/dn 와 應力強度係數範圍 ΔK 를 兩對數座標에 一括하여 나타내면 Fig. 11과 같다.

3.1절에서 說明한 바와 같이 균열 길이 b 를 고려하지 않은 通常의인 $da/dn-\Delta K$ 의 相關關係로 나타낸 것을 보면 材質과 板 두께에 따른 全試驗片에 걸쳐 直線性이 나타나 있지 않음을 알 수 있다.

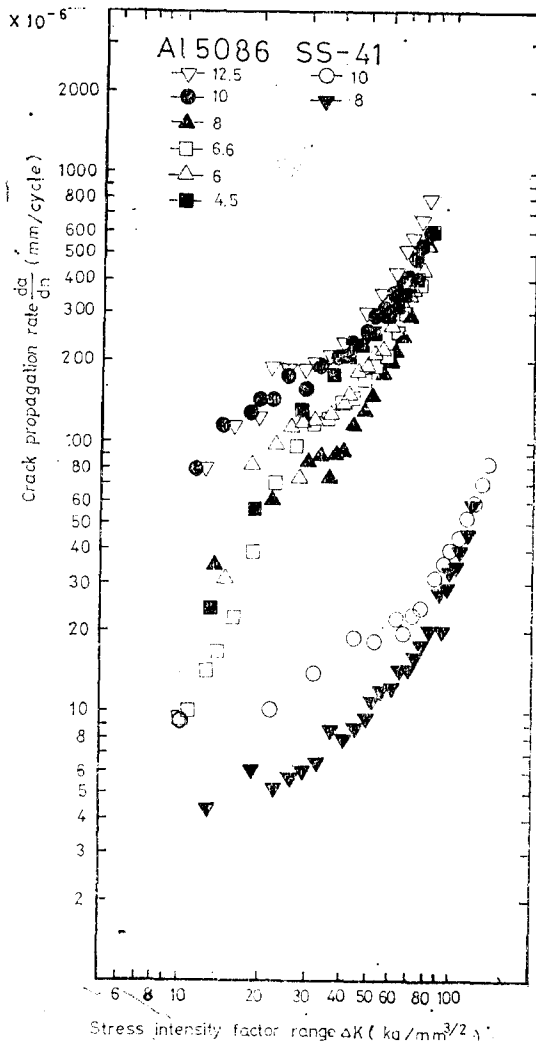


Fig. 11 Relation between stress intensity factor range and crack propagation rate

균열 길이를 고려한 式(2), (3)을 利用하여 구한 破面面積成長速度 ds/dn 와 應力強度係數範圍 ΔK 를 兩對數座標에 一括表示한 것으로서 ds/dn 와의 關係는 Fig. 12와 같이 直線性이 나타나 있음을 알 수 있다.

또한 이 結果에 의하면 破面面積成長速度에 미치는 材質의 變化와 두께의 變化에 따른 效果도 나타나 있다. 즉, 破面面積成長速度는 알루미늄 合金材가 軟鋼材의 경우보다 크고, 같은 材質에 있어서는 板두께가 두꺼운 경우가, 작은 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다.

여기서 알루미늄 合金材와 軟鋼材의 경우에 그 破面面積成長速度에 영향을 미치는 要因으로

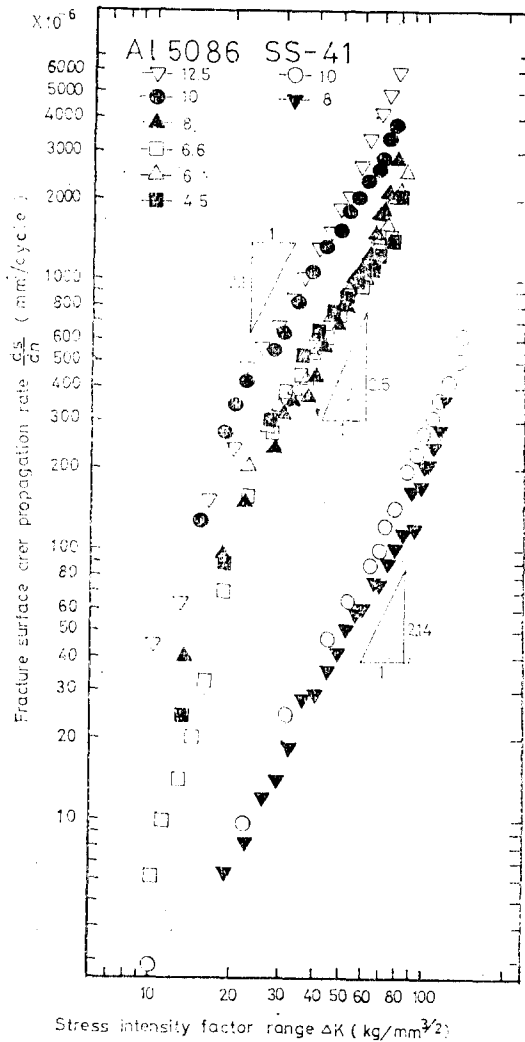


Fig. 12 Relation between stress intensity factor range and fracture surface propagation rate

생각되는 機械的 特性을 比較해 보면 引張強度, 降伏點 등은 큰 差이가 없으나, 材料의 彈性係數에 있어 軟鋼은 $E=2.1 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$, 알루미늄 합금材는 $E=0.72 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$ 로 큰 差이를 나타내고 있다. 따라서 破面面積成長速度는 材質의 彈性係數에 의해 지배를 받는 것으로 思料된다.

이러한 事實에 입각하여 ΔK 를 E (Young's modulus)로 나눈 값인, 變形率強度係數範圍(Strain intensity factor range)¹⁰⁾ $\Delta K/E$ 와 破面面積成長速度 ds/dn 과의 關係를 整理한 結果는 Fig. 13과 같다.

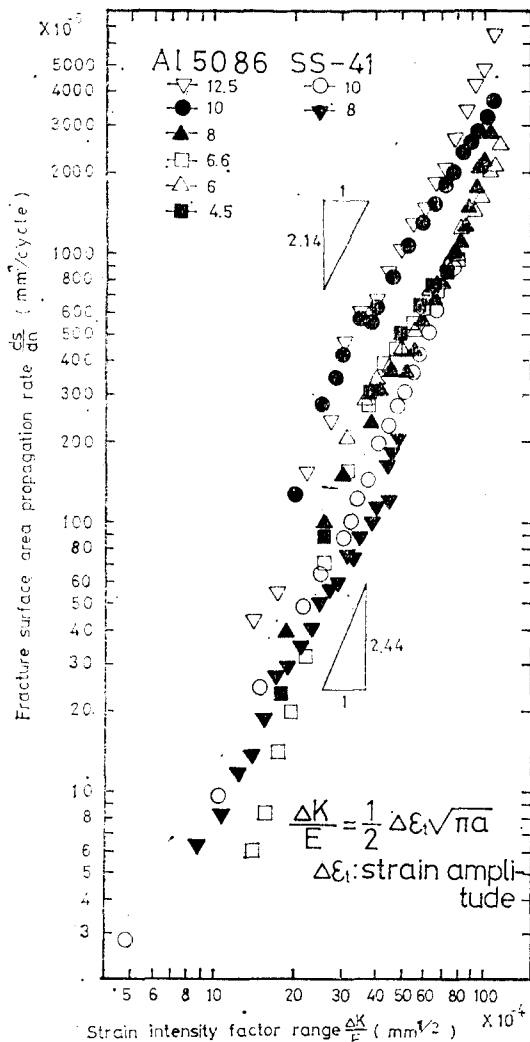


Fig. 13 Relation between strain intensity factor range and fracture surface propagation rate

이에 의하면 破面面積成長速度에 미치는 試驗片의 두께에 다른 依存性은 나타나나, 材質에 다른 變化에는 關係없이 하나의 그룹(Group)으로 整理될 수 있음을 나타내고 있다.

破面面積成長速度에 미치는 試驗片 두께 依存性을 考慮하여 破面面積의 增加分 ΔS 를 試驗片 두께 t 로 나눈 값 $\Delta S/t$ 를 相當 균열 길이 增加分(Equivalent crack length increment) Δa_E 로 취하여, 相當 균열 길이 成長速度(Equivalent crack length growth rate) da_E/dn 과 $\Delta K/E$ 값과의 關係를 整理하면 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다. 이 結果에 의하면 材質이 變化나, 試

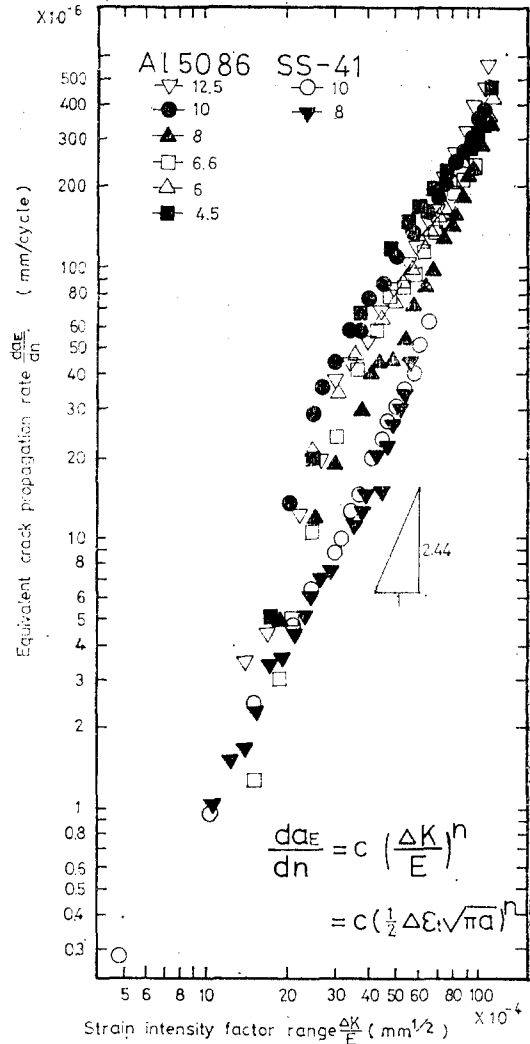


Fig. 14 Relation between strain intensity factor range and equivalent crack propagation rate

驗片 두께의 變化에 關係없이 모든 實驗結果는 하나의 Band 內에 整理될 수 있음을 보이고 있다.

一般的인 貫通균열의 경우, 균열 成長速度 da/dn 과 應力強度係數範圍 ΔK 와의 關係를 規定짓는 Paris rule은 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{da}{dn} = C(\Delta K)^n \quad (4)$$

여기서 C 와 n 는 材料常數이다.

本 實驗과 같이 균열 進展에 따라 균열의 形狀變化가 連續的으로 나타나는, 모서리 균열의 경우에 以上の Paris rule을 引用하면, Fig. 14의 結果에 의해 다음과 같이 整理할 수 있다.

$$\frac{da_E}{dn} = C \left(\frac{\Delta K}{E} \right)^n = C \left(\frac{1}{2} \Delta \epsilon_s \sqrt{\pi a} \right)^n \quad (5)$$

여기서 $C \approx 2.6 \times 10^{-8}$

$$n \approx 2.44$$

$\Delta \epsilon_s$: $\frac{\Delta S_b}{E}$ 인 變形率 振幅(Strain amplitude)

進以上の 式(5)를 利用하면 모서리 균열의 경우에 板두께나, 材質의 變化에 關係없이 균열 進展特性이 一意的으로 評價될 수 있다.

3.4 모서리 균열의 傳播舉動에 미치는 過負荷의 영향

實際 構造物에 있어서, 一定한 振幅의 反復荷重을 받는 경우는 드물고, 不規則한 크기의 反復荷重을 받는 것이 보통이다. 따라서 균열 成長舉動에 미치는 過負荷의 影響을 檢討할 必要가 있다.

모서리 균열의 成長舉動에 미치는 過負荷의 影響을 檢討하기 위하여 Fig. 4에 나타낸 2 段의

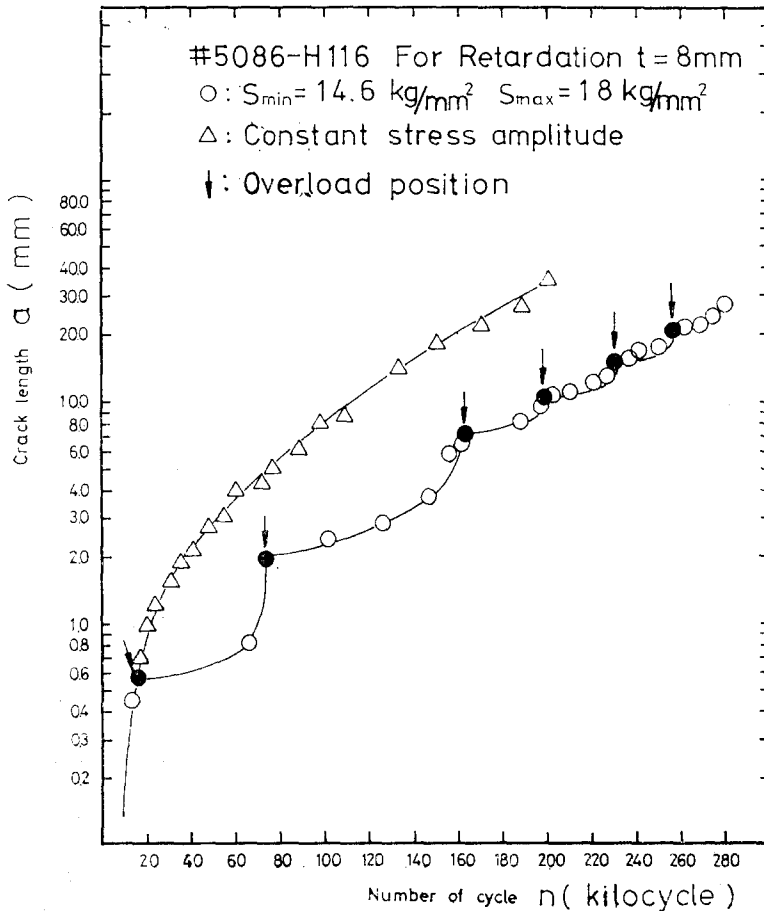


Fig. 15 Retardation as a result of overload

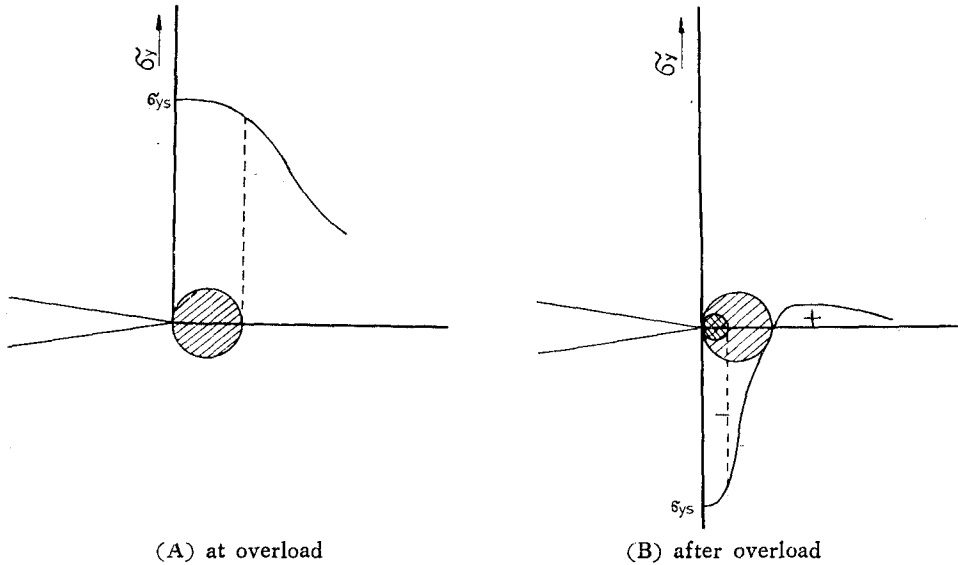


Fig. 16 Residual compressive stresses at crack tip as a result of overload

片振平面 굽힘 應力을 加한 경우와, 一定한 振幅의 굽힘 應力을 加한 경우에 대하여 균열 進展 길이 a 와 反復回數 N 과의 關係를 片對數座標에 表示하면 Fig. 5와 같다. 이 結果에 의하면 균열 展速度는 過負荷直後에 현저히 느린 樣相을 보이고 있다.

이와 같이 過負荷直後 균열 進展速度가 느리게 나타나는 理由는 다음과 같이 생각된다.

Fig. 16(A)에 나타나는 바와 같이 過負荷에

의하여 넓은 塑性領域이 초래되어 材料의 部分的인 變形이 일어나지만 應力을 제거하면 塑性域은 彈性材料에 둘러싸이게 된다. 彈性領域에 둘러싸인 균열 先端 주위의 塑性領域內에는 彈性領域의 材料에 의하여 壓縮應力이 作用하고, 그 結果 Fig. 16(B)와 같은 잔류 應力이 나타난다. 이 잔류 應力은 疲勞균열 傳播機構인 開閉作用이 일어나지 못하도록 방해하는 方向으로 作用한다. 그러므로 荷重反復回數 N 가 增加하

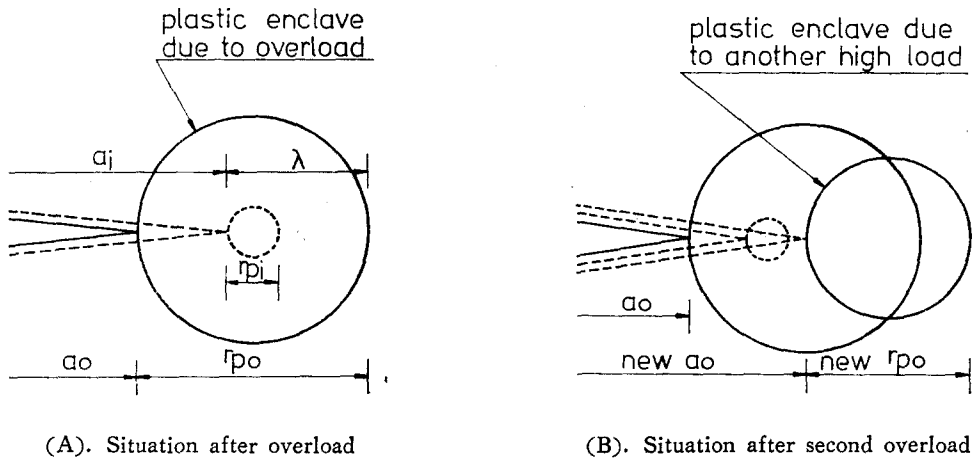


Fig. 17 The model of Retardation

여 이 잔류 應力을 극복해야만 다시 균열 成長이 일어나서 원래의 균열 傳播速度로 돌아오게 되는 것으로 思料된다.²⁰⁾

以上과 같은, 實驗結果를 利用하면 過負荷 直後 均열 進展速度 $\left(\frac{da}{dn}\right)_{retard}$ 와, 정상적인 均열 進展速度 $\left(\frac{da}{dn}\right)_{normal}$ 와의 사이에는 다음과 같은 關係가 成立한다.

Fig. 17(A)에서와 같이 過負荷가 있기 전까지의 均열 長이를 a_0 라 할 때 過負荷에 의해 生成된 塑性 領域의 크기 r_{p0} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{p0} = C_1 \frac{\Delta S_0^2 a_0}{\sigma_{ys}^2} = C \frac{\Delta K_0^2}{\sigma_{ys}^2} \quad (6)$$

여기서 ΔS_0 : 過負荷 應力振幅

ΔK_0 : 過負荷 應力強度係數範圍

均열이 過負荷에 의하여 生成된 塑性 領域의 크기 r_{p0} 內에서 一定 長이 a_i 까지 成長하여, 그 先端에서 다시 生成된 塑性 領域의 크기 r_{pi} 는 다음과 같다.

$$r_{pi} = C_1 \frac{\Delta S_i^2 a_i}{\sigma_{ys}^2} = C \frac{\Delta K_i^2}{\sigma_{ys}^2} \quad (7)$$

여기서 ΔS_i : i 번째 cycle의 應力振幅

ΔK_i : i 번째 cycle의 應力強度係數範圍

그러나 r_{pi} 는 r_{p0} 內에 있고, 또한 減速 매개 變數(Retardation parameter)를 ϕ 라 하면, Fig. 17(A)에서와 같이 $\lambda = a_0 + r_{p0} - a_i$ 이므로 減速 매개 變數 ϕ 는 다음과 같이 表示될 수 있다.²¹⁾

$$\phi = \left(\frac{r_{pi}}{\lambda}\right)^m = \left(\frac{r_{pi}}{a_0 + r_{p0} - a_i}\right)^m \quad (8)$$

여기서 m : 材料常數

따라서, $a_i + r_{pi} < a_0 + r_{p0}$ 일때 過負荷 直後 均열 進展速度 $\left(\frac{da}{dn}\right)_{retard}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{da}{dn}\right)_{retard} = \phi \left(\frac{da}{dn}\right)_{normal} = \phi f(\Delta K) \quad (9)$$

그리고 $a_i + r_{pi} \geq a_0 + r_{p0}$ 일때에는 均열은 過負荷의 領域을 넘어서므로 減速 매개 變數 $\phi = 1$ 이다.

本 實驗結果를 이용하여 歸納的인 方法에 의해 指數 m 값을 求하면 $m > 1$ 이므로 過負荷에 의하여 生成된 塑性 領域의 크기가 커지면 커질수

록 ϕ 는 1보다 매우 작아져서 減速效果(Retardation effect)는 더 增加한다.

4. 結 論

本 實驗의 結果로 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 모서리 均열(Corner crack)의 경우, 均열 傳播舉動의 評價에 있어서는 貫通均열(Through crack)에 있어서와 같이 均열 長이의 傳播速度 da/dn 와 應力強度係數範圍 ΔK 와의 相關關係에 의한 것보다 破面面積成長速度 ds/dn 와 ΔK 의 相關關係에 의한 評價가 더 合理的이다.

2. 平滑平板에 있어서는 모서리 均열의 形狀變化는 均열 長이 a 와 均열 長이 b 및 試驗片 두께 t 와의 相關關係에 의하여 다음과 같은 式에 의해 一意的으로 評價할 수 있다.

$$\frac{b}{a} = 1 - \frac{b}{t}$$

3. 모서리 均열은 試驗片 두께가 두꺼우면 두꺼울수록, 試驗材의 彈性係數(Young's modulus)가 작으면 작을수록 均열 傳播速度는 다같이 빠르다.

4. 모서리 均열의 경우에는 Paris rule의 da/dn 代身에 相當 均열長이 傳播速度 da_E/dn 와 變形率強度係數範圍(Strain intensity factor range) $\Delta K/E$ 를 適用함으로써 試驗片 두께나 材質의 變化에 關係없이 均열 傳播特性은 다음과 같은 關係式에 의해 評價된다.

$$\frac{da_E}{dn} = C \left(\frac{\Delta K}{E}\right)^n = C \left(\frac{1}{2} \Delta \epsilon_i \sqrt{\pi a}\right)^n$$

5. 모서리 均열인 경우에도 過負荷의 영향에 의하여 減速效果(Retardation effect)가 있음은 明白하고, 그 減速 매개 變數 ϕ 는 다음과 같은 關係가 成立된다.

$$\left(\frac{da}{dn}\right)_{retard} = \phi \left(\frac{da}{dn}\right)_{normal} = \phi f(\Delta K)$$

$a_i + r_{pi} < a_0 + r_{p0}$ 일때만 $\phi < 1$ 이다.

參 考 文 獻

1. ASM; Failure Analysis and Prevention, Metal Hand-book, Vol.10, ASM, Ohio, pp.332~372(1975).
2. J.C. Newman.; Fracture Analysis of Surface and Through-Cracked Sheet Plates, Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, pp.667~689(1973).
3. G.R. Irwin; The Crack Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate, Trans, ASME, J. Appl. Mech. pp.651~656(1962).
4. J.R. Rice, M. Levy; The Part-Trough Surface Crack in an Elastic Plate, Trans, ASME, J. Appl. Mech. pp.185(1972).
5. 李樂周等：無限平板에 橢圓形 Crack을 가진 圓周圍의 應力分布에 關한 研究, 大韓機械學會誌, Vol.15, No.4 pp.393~403(1975).
6. 川原正言, 栗原正好：表面き裂の疲勞による 傳播成長過程に關する豫備的考察, 日本造船學會 論文集, Vol.137 pp.297~306(1975).
7. 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.25, No.289, pp.955~961(1977).
8. 長谷部宣男, 上田 稔：段他ぐう角部にき裂を有する半無限板の面外曲げ, 日本機械學會, 論文集, Vol.46, No.409 pp.985~989(1980).
9. 宗智浩：破壊力學의 現況(Ⅱ), 大韓機械學會誌, Vol.21, No.1, pp.10~20(1981).
10. ASM: Fractography and Atlas of fractography, Metal Handbook, Vol.9, ASM, Ohio, pp.49~62, 191~289(1975).
11. JWS; 鐵鋼溶接部の液面寫眞集, 黒木出版社, 大阪, pp.393~499(1975).
12. 比川英夫, 小寺澤良一：フラクトグラフィ, 破壊力學と材料強度講座, 培風館, 東京, pp.79~121(1982)
13. 金澤, 野田, 糸賀：表面缺陷からの疲勞龜裂 傳播特性について(等一報), 日本造船學會 論文集, Vol.132, pp.395(1972).
14. 向井喜彦, 山崎信二：形状不連續付平板の非貫通形缺陷に對する曲げ疲勞壽命豫測(等一報), 日本造船學會論文集, Vol.151, pp.245~254(1982).
15. David Broek; Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands, pp.80~86(1973).
16. 金永直, 趙相明：平均 굴림 疲勞荷重에 의한 鋼溶接部의 모서리 굴림 傳播特性, 大韓機械學會 論文集, Vol.6, No.3, pp.232~238 (1982).
17. 前掲書(11), p.416~417.
18. 前掲書(15), pp.48~53.
19. 村上裕則, 大南正漢：破壊力學入門, オーム社, 東京, pp.141~143(1976).
20. H.O. Fuchs, R.I. Stephens; Metal Fatigue in Engineering, A. Wiley-Inter science Publication, New York, pp.204~213(1980).
21. 前掲書(15) p.259.