

< 論 文 >

# 작은 表面缺陷에서 發生·成長하는 表面疲勞균열의 成長特性에 관한 研究

徐 昌 敏\* · 權 五 憲\*\* · 李 正 州\*\*\*

(1986年 6月 28日 接受)

## Crack Growth Behavior of Fatigue Surface Crack Initiated from a Small Surface Defect

Chang-Min Suh, O-Heon Kwon and Jung-Ju Lee

**Key Words:** Surface Crack(표면균열), Cyclic Total Strain(反復全스트레인), Cyclic Total Strain Intensity Factor(反復全스트레인 擴大係數), Stress Dependence(應力依存性), Hysteresis Loop(히스테리시스 루우프), Cyclic Stress-Strain Curve(反復應力-스트레인곡선)

### Abstract

It has been well known that the fracture mechanics can be applied to large through crack growth. But the growth rate of small surface cracks initiated from a small defect under rotary bending fatigue tests can not be treated as a function of stress intensity factor range.

In this paper, to investigate the growth behavior of surface small fatigue cracks in the viewpoint of both fracture mechanics and strength of materials, the fatigue test has been carried out on two kinds of plain carbon steels with a small surface defect.

Applying the concept of the cyclic strain intensity factor range  $\Delta K_e$ , to the analysis of small surface fatigue crack growth, it is found that the relationship between cyclic strain intensity factor range and crack growth rate shows linear relation on logarithmic coordinates regardless of defect sizes and two kinds of carbon steels.

### 1. 序 論

破壊力學의 發達과 더불어 行하여진 大部分의 研究

\* 正會員, 慶北大學校 工科大学 機械工學科

\*\* 正會員, 慶北大學校 大學院

\*\*\* 正會員, 韓國科學技術大學 生産機械科

에서는 貫通大균열이 主對象이었지만 實際 主要한 構造物인 原子爐, 高壓탱크, 高壓配管系, 車輪 및 般空機等的 破壞의 原因으로는 작은 表面균열에 의한 境遇가 많기 때문에 이것이 크게 問題視되고 있다<sup>(1~10, 13)</sup>. 특히 F-111 기의 추락사건을 포함한 여러 중요 파괴의 주역할을 했던 주균열의 발생 원인을 분류하면 재료에 존재하는 결함과 제조과정 중에 생긴 결함이 55% 이

상을 차지하며 그 외 운전중에 생긴 부식공이나 표면 흠이 12.8%, 설계불량에서 생기는 결함이 15.8%, 미확인된 것이 16.4%로 분석되고 있다<sup>(13)</sup>. 즉 파괴의 주요인은 이미 재료상에 존재하는缺陷들과 제조과정중에 생긴 표면 결함이며 결정적인 역할을 한다. 따라서 機器, 構造物의 設計 및 安全性評價를 위하여 작은表面균열의 기초적인 資料의 축적이 必要하게 되었으며, 이에 대한 工業的 및 工學的 重要性이 새로이 認識되고 있다.

本 研究에서는 이상과 같이 그 重要性이 認定되는 작은 表面疲勞균열의 成長特性을 調査하기 위하여 軟鋼과 中炭素鋼에 두 종류의 작은 表面缺陷을 加工한 네가지 種類의 試驗片을 製作하고, 應力比  $R = -1$ 인 小野式 回轉급입 疲勞試驗을 통하여 작은 表面缺陷이 疲勞強度에 미치는 영향과 그 成長特性을 調査한 후 應力擴大係數  $K$ 를 使用하는 方法과 反復全스트레인 擴大係數範圍  $\Delta K\epsilon_s$ 를 比較 檢討하여 그 有効성을 調査하고 이를 破壞力學的 側面에서 考察하였다.

## 2. 試驗片 및 實驗方法

### 2.1 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗片材料는 市販의 軟鋼(C-0.15%)과 中炭素鋼(C-0.45%)으로서 直徑은 各各 16mm, 24mm인 熱間壓延丸棒이다. 이 材料들은 試驗片을 加工하기 前에 軟鋼은 930°C에서, 中炭素鋼은 845°C에서 各各 한 時間씩 加熱한 後 爐冷시켰다. Table 1은 시험편의 화학적 성분과 열처리후의 기계적 성질을 나타내며, 軟鋼의 시험편은  $H$ 材, 또 中炭소강시험편은  $K$ 라 칭한다.

試驗片은 熱處理된 材料를 機械加工한 後, 에머리 페이퍼로 1,200番까지 연마하고 試驗片 中央平滑部

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

Material	C	Si	Mn	P	S	
wt (%)	$K$	0.43	0.33	0.65	0.017	0.032
	$H$	0.15	0.17	0.62	0.03	0.05
Material	Yielding point kgf/mm <sup>2</sup>	Tensile strength kgf/mm <sup>2</sup>	Elongation (%)	Hardness Hv		
$K$	30	54.5	48.4	172		
$H$	26.5	43.8	50.3	125		

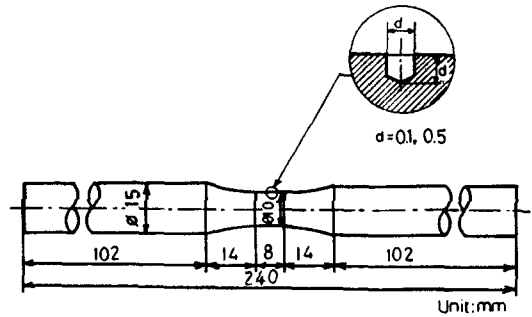


Fig. 1 Configuration of the specimen and the pits

表面에 다이얼게이지가 附着된 드릴링머시인을 使用하여 人工缺陷을 加工하였다. 人工缺陷은 Fig. 1과 같이 直徑 0.1mm 깊이 0.1mm, 直徑 0.5mm 깊이 0.5mm인 두 種類의 작은 人工缺陷을 加工하였다.

人工缺陷이 加工된 各 試驗片은 殘留應力을 제거하기 위하여 各各 600°C에서 한 時間씩 眞空熱處理를 실시한 後, 酸化크롬분말로 磨平하였다.

이러한 方法으로 製作된 네가지 種類의 試驗片은 表面레프리카 및 광학현미경을 使用하여 그 加工 精密度를 확인한 後 疲勞試驗에 使用하였다.

### 2.2 實驗方法

表面疲勞균열의 測定은 表面길이(2a)를 基本的 測定量으로 하고, 表面레프리카法으로 表面疲勞균열길이를 採取한 後 光學顯微鏡으로 測定하였다. 또한 균열길이는 溫퍼칼러법에 의하여 형성된 균열깊이를 이동현미경으로 측정하였다.

또한 全스트레인 範圍 및 應力-스트레인 히스테리시스曲線은 試驗片 균열 測定部의 反對側 平滑平行部 中央에 스트레인 게이지를 附着하여 測定하였다. 이때 全스트레인이 安定化되는 과단수명의 20% 以前에서는 과단壽命의 5%마다 그 以後에서는 과단壽命의 10%마다 疲勞試驗機를 停止시킨 後 스트레인 게이지(게이지 길이를 2mm)를 스트레인 測定器에 連結시켜 測定하였다.

## 3. 實驗結果 및 考察

### 3.1 表面균열의 발생 및 成長特性

$S-N_c$  曲線의 例로서  $K$ 材(中炭素鋼) 試驗片의 結果를 Fig. 2에 나타낸다. 이 그림上에는  $S-N_c$  曲線에 等균열길이 폭선이 중첩되어 있다.

本 實驗에서 구한  $K$ 材 平滑材의 疲勞限度는 25.5

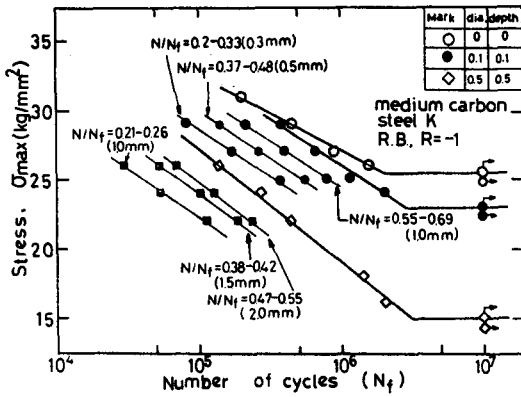


Fig. 2 Relationship between bending stress and the number of load cycles for the surface crack length at various stages of the fatigue life

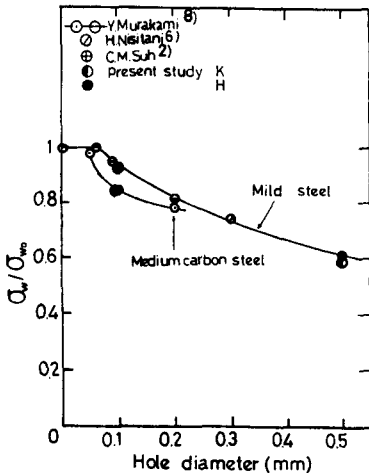


Fig. 3 Relationship between the hole diameter and the fatigue strength of holed specimens,  $\sigma_w$ , relative to that of equivalent smooth specimens,  $\sigma_{w0}$

kg/mm<sup>2</sup> 이고 直徑 0.5mm 깊이 0.5mm 缺陷材와 直徑 0.1mm 깊이 0.1mm 인 작은 缺陷材의 疲勞材의 疲勞限度는 各各 15kg/mm<sup>2</sup>, 23kg/mm<sup>2</sup> 이다. 缺陷의 直徑 0.5mm 깊이 0.5mm 인 K 材의 경우는 平滑材의 41.2%, 直徑 0.1mm 깊이 0.1mm 인 K 材의 경우는 9.8% 低下하였다. 이러한 작은 人工缺陷에 의한 疲勞限度의 低下는 材料의 種類 및 表面缺陷의 종류에 따라서 疲勞균열의 發生 및 成長特性이 다르기 때문이다.

Fig. 3는 疲勞強度에 미치는 人工缺陷의 영향을 나타낸 資料<sup>(6)</sup>에 本實驗에서 얻은 結果를 同時에 표시한 것이다. 즉 軟鋼材의 경우는 缺陷直徑이 70 $\mu$ m 보

다 작으면 疲勞限度가 低下하지 않고, 中炭素鋼材는 缺陷直徑이 35 $\mu$ m 보다 작으면 疲勞限度가 低下하지 않고 있다<sup>(8)</sup>.

또 直徑 0.5mm, 깊이 0.5mm 缺陷材가 直徑 0.1mm 깊이 0.1mm 人工缺陷材 보다 疲勞限度减小率이크고, 疲勞強度에 미치는 缺陷敏感度가 큼을 나타낸다

Fig. 2 상의 各 等균열曲線은 서로 거의 平行하며 S-N<sub>f</sub> 曲線과도 거의 平行하다. 이는 人工缺陷材의 疲勞균열 成長特性으로서 反復數比(N/N<sub>f</sub>)가 같을 경우에 應力레벨에 관계없이 거의 같은 表面疲勞균열길이 만큼 成長한다는 것을 나타내며 이와 같은 疲勞균열 成長特性은 軟鋼<sup>(2)</sup> 및 硬強線材<sup>(9)</sup>의 경우에서도 볼 수 있다.

작은 人工缺陷에서 發生·成長하는 表面疲勞균열의 表面疲勞균열길이 (2a)와 疲勞반복수 (N)와의 關係를 나타낸 2a-N 曲線을 利用하여 反復數比 (N/N<sub>f</sub>)와 表面疲勞균열길이와의 關係를 例로서 Fig. 4에 나타낸다. 各各의 曲線에서 曲線의 경사는 반복회전수의 증가에 따라 증가하며 應力레벨의 차이에 따른 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 直徑 0.5mm 깊이 0.5mm 缺陷材가 直徑 0.1mm 깊이 0.1mm 缺陷材보다 疲勞균열成長速度가 初期단계에서 더 빠름을 알 수 있으며, 各各 應力레벨의 차이에 關係없이 비교적 좁은 밴드를 형성하였다. 이는 Fig. 2 상의 等균열길이 曲線과 같은 結果를 나타내는 것이다.

Fig. 4을 보면 表面疲勞균열은 N/N<sub>f</sub>가 0.2 以前에서 發生하여 圓滑하게 成長하며, 疲勞수명의 80% 이

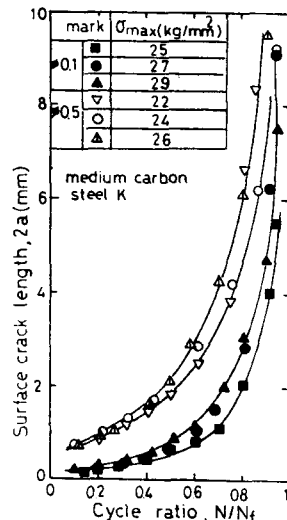


Fig. 4 Relationship between surface crack length and the cycle ratio

後에서는 급격하게 成長하여 疲勞과 단함을 알 수 있었다. 또 K材의 直徑 0.1mm 길이 0.1mm 缺陷材에서는 初期에서 균열이 發生하여 疲勞균열길이 (2a)가 2 mm 정도로 成長하였을 때 疲勞수명의 約 70~80%를 소비하였으며, 直徑 0.5mm 길이 0.5mm 缺陷材에서는 表面疲勞균열길이 2mm 程度로 되었을 때 수명의 約 50%까지 소비하고 疲勞균열길이 5mm 程度까지 成長되었을 때 疲勞수명의 70~80%를 소비하였다. 이와 같은 表面疲勞균열의 成長特性은 材料의 強度와 缺陷敏感度에 밀접한 關係가 있는 것으로 생각된다. 또한 缺陷이 작으면 균열이 發生하기 어렵고 缺陷이 크게 되면 균열發生이 빠르고 初期 成長速度가 높은 傾向을 나타낼 수 있다.

3.2 깊이方向에서의 균열의 發生·成長特性

균열의 表面길이와 깊이의 形狀比 b/a, 즉 균열面形狀의 成長에 수반하는 變化를 Fig. 5에 나타내었다. 이 Fig. 5에서 보면 疲勞균열成長과 함께 形狀比 b/a가 급속히 低下하여 b/d가 0.3 以上에서는 人工缺陷크기에 關係없이 形狀比가 거의 一定한 約 0.6(≐ $\frac{2}{\pi}$ )이 되었다. 이것은 疲勞균열面이 圓형하게 되는 것을 의미한다.

각 缺陷材의 경우, 應力레벨에 關係없이 좁은 밴드 內에 모이는데 이는 形狀比의 變化에 미치는 應力레벨의 影響은 매우 적은 것을 나타낸다.

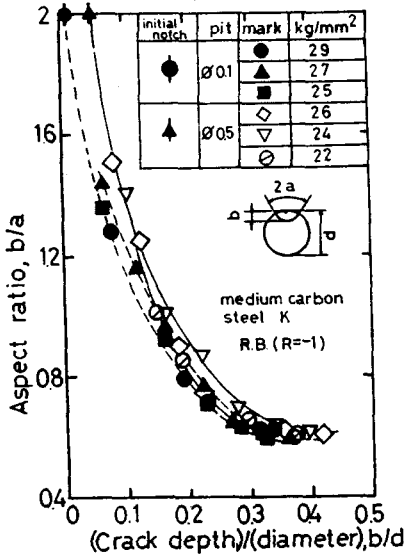


Fig. 5 Relationship between aspect ratio, b/a, and the ratio of crack depth versus the diameter of specimen

또 缺陷에서 發生한 疲勞균열의 깊이 方向길이 b의 成長을 반복수비 (N/N<sub>f</sub>)에 대해서 정리해 보면 Fig. 6와 같고 Fig. 4의 2a-N/N<sub>f</sub> 曲線에서의 마찬가지로 이 경우에서도 應力레벨의 차이에 關係없이 각 缺陷마다 比較的 좁은 분산대에 모인다. 이와 같이 b-N/N<sub>f</sub> 特性에서도 應力依存性이 적은 것은 等균열길이 曲線이 各各 S-N<sub>f</sub> 曲線에 거의 平行인 것을 나타낸다. 또한 Fig. 6에서 보면 直徑 0.5mm 길이 0.5mm 缺陷材의 경우가 直徑 0.1mm 길이 0.1mm 缺陷材의 경우보다 初期에서 부터 比較的 빠른 成長을 하고 있음을 알 수 있다.

3.3 表面疲勞균열 成長速度의 破壞力學的 整理

人工缺陷材上에서 發生·成長하는 작은 表面疲勞균열 成長特性을 破壞力學的 側面에서 비교·조사하기 위하여  $\sigma_{max} \sqrt{\pi a}$ 와  $d(2a)/dN$  關係를 兩對數 좌표에 표시하면 Fig. 7의 例와 같은 結果를 얻었다. 여기서 사용한  $\sigma_{max} \sqrt{\pi a}$ 와  $d(2a)/dN$  값은 균열 發生直後는 人工缺陷의 形狀과 크기에 따라 균열成長에 미치는 影響이 크기 때문에, 直徑 0.5mm 길이 0.5mm 인 缺陷材의 경우에는 表面疲勞균열 長이가 約 0.8mm 以上부

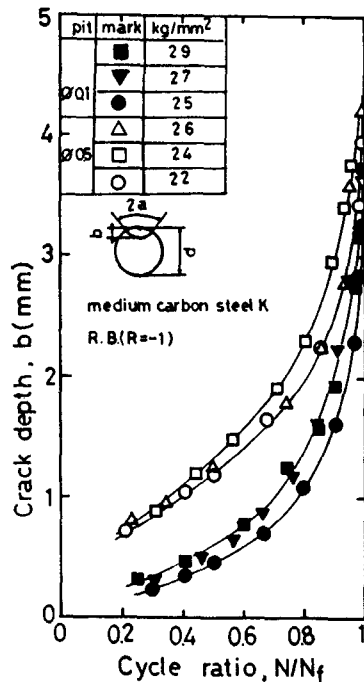


Fig. 6 The relations of crack depth to the cycle ratio

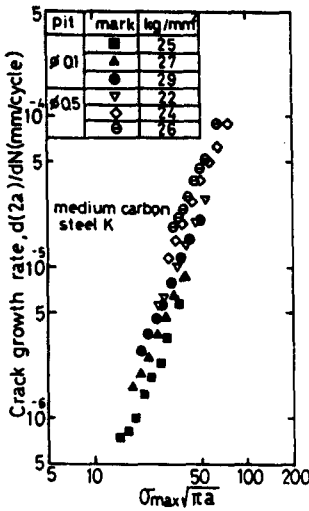


Fig. 7 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the stress intensity factor range

터, 直徑 0.1mm 길이 0.1mm 인 缺陷材는 表面疲勞균열 길이가 0.25mm 까지 成長한 以後부터 計算한 값이다. 이때 수정계수는 일정한 값 [ $f(a)=1$ ]으로 가정하였다.

各 조건下의 各 應力에 있어서는 表面疲勞균열 成長速度가 최대 應力擴大係數에 잘 依存하고 있으나, 各 조건別 應力레벨에 따라 各各 다른 直線이 나타나고 서로 거의 平行하게 되는데 이 現象은 韌性應력을 받는 경우의 특이한 現象으로 材料의 加工硬化指數와 관련이 있는 것으로 考察되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 이러한 應力依存性은 平滑材 表面에 發生하는 微小疲勞균열의 경우<sup>(1)</sup>와 直徑 0.5mm 길이 0.5mm 인 軟鋼缺陷材의 경우에서도 같은 경향이 보고 되고 있다<sup>(2)</sup>.

이와 같이 最大應力擴大係數  $\sigma_{max} \sqrt{\pi a}$  를 使用하여 破壞力學의 解析을 하여 본 結果, 應力에 따라서 各各 다른 直線이 얻어지기 때문에 하나의 統一의 方法을 구하기 위하여 종래의 應力擴大係數의  $\sigma_{max}$  항 대신에 反復全스트레인量  $\Delta \epsilon_t$  를 使用한 反復全스트레인擴大係數範圍  $\Delta K \epsilon_t$ <sup>(1,2)</sup>를 使用하였다.

### 3.4 缺陷材에서의 應力-스트레인의 히스테리시스 특성

반복회전수  $N$ 의 증가에 따르는 全스트레인範圍  $\Delta \epsilon_t$ 의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 그 例로서  $K$ 材의 直徑 0.1mm 길이 0.1mm 缺陷材의 資料이다.

各材 모두 Fig. 8처럼 全스트레인 範圍  $\Delta \epsilon_t$ 의 安定時期가 疲勞수명의 約 20% 以前에서 도달되어 安定한 값을 취하다가 파단직전에는 다시  $\Delta \epsilon_t$ 가 급격히 증가하였다. 疲勞수명의 20% 以前에서  $\Delta \epsilon_t$ 가 증가하는 것은 材料가 反復硬化를 일으키기 때문이다. 또 파단 직전의 급격한 증가는 表面균열길이가 비교적 크므로 균열의 開口변위에 의한 컴플라이언스의 영향에 起因하는 것으로 생각된다.

疲勞수명의 20% 以後의 安定된 이 스트레인範圍  $\Delta \epsilon_t$  값을 使用하여 작은 表面疲勞균열에 대한 破壞力學의 解析을 行하였다.

Fig. 8에서 구한 全스트레인 값은 各 應力레벨에서 各各 하나의 試驗片을 使用하여 구해진 것이다. 그러나 하나의 試驗片을 使用하여 安定된 反復全스트레인 範圍를 구하기 위하여 多段法(multiple step method)도 병용하였다. 이 方法에 의하여  $K$ 材,  $H$ 材 各各에 대한 反復全스트레인 量을 測定하여 反復應力-스트레인 曲線을 그릴 것 중에서 例를 Fig. 9에 나타내었다. 이 方法으로 구한 反復全스트레인量은 Fig. 8의  $\Delta \epsilon_t$  값과 잘 일치하였다.

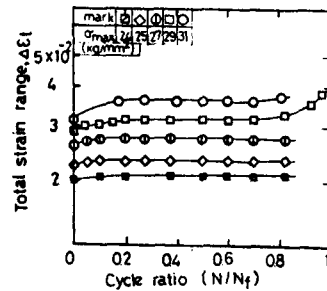


Fig. 8 Stabilization of cyclic total strain range,  $\Delta \epsilon_t$ , in the early stage of fatigue life for S45C

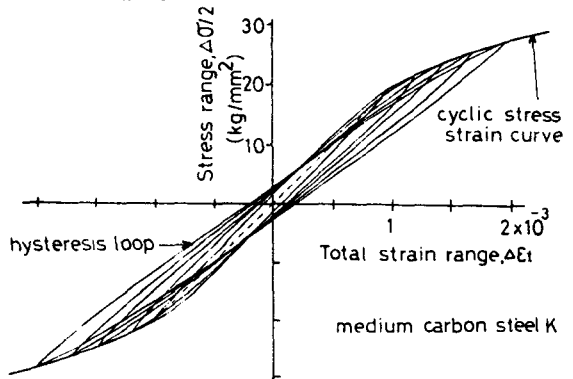


Fig. 9 Cyclic stress-strain curve obtained from hysteresis loops by the multiple step method

3.5  $\Delta K\epsilon_t - d(2a)/dN$  特性

앞절에서 구한 안정화된 손스트레인 範圍를 使用한 反復손스트레인 擴大係數의 依存性을 調査하여 작은 表面疲勞균열에 대한 破壞力學의 解析을 하였다.

K 材 및 H 材의  $\Delta K\epsilon_t$  와  $d(2a)/dN$  을 兩對數紙上에 나타내면 Fig. 10 과 같다. 이때 수정계수  $f(a)$  는 일정한 값 (=1) 으로 가정하였다.

즉 Fig. 7 과 같은 各 材料의 應力레벨에 따른 應力 依存性은 거의 없으며 H 材, K 材, 缺陷材에 無關하게 거의 하나의 直線形態로 나타나 統一的인 整理가 可能하였다. 또한 點線으로 나타낸 軟鋼의 資料<sup>(2)</sup> 와도 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 즉 이 關係는  $d(2a)/dN = C(\Delta K\epsilon_t)^m$  으로 나타낼 수 있으며, 本 實驗에서는  $C = 4.37 \times 10^{-7}$ ,  $m = 2.4$  를 얻어  $d(2a)/dN = 4.37 \times 10^{-7} (\Delta K\epsilon_t)^{2.4}$  로 表示된다.

이와 같은 結果는 塑性疲勞에 대해서도  $\sigma_{max} \sqrt{\pi a}$  대신에  $\Delta\epsilon_t \sqrt{\pi a}$  항을 使用할 수 있는 可能性과 여러 種類의 材料에 대해서도 人工缺陷의 크기에 關係없이  $\Delta K\epsilon_t$  로 表面疲勞균열 成長速度를 統一的으로 整理할 수 있을 可能性을 나타낸다<sup>(4,9,11)</sup>.

이 작은 表面疲勞균열의  $\Delta K\epsilon_t$  依存性의 意味를 생각해 보면 應력레벨이 疲勞限度를 초과하며 應力比  $R = -1$  이기 때문에 應力-스트레인 히스테리시스 曲線이

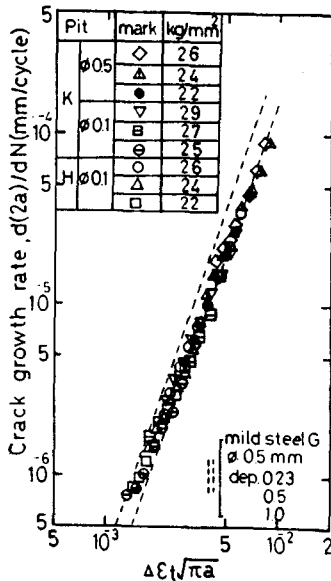


Fig. 10 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the cyclic total strain intensity factor range

Fig. 9 과 같이 기울어 지고 있다. 이것은 屈曲應力을 받고 있는 本 研究의 特殊한 경우로서 各 應力조건에서 材料의 加工硬化 및 材料의 部分的인 塑性作用으로 인하여 탄성계수  $E$  를 나타내는 값이 점차 低下하기 때문인 것으로 생각된다<sup>(11)</sup>.

3.6  $\Delta K_I - d(2b)/dN$  特性

疲勞균열의 깊이方向의 成長特性을 파악하기 위하여 Fig. 6 과 같은 균열最深點깊이  $b$  와  $N/N_f$  의 관계資料를 利用하여 最深點의  $\Delta K_I$  를 다음과 같은 方法으로 計算하였다. 즉 回轉屈曲疲勞試驗片의 경우에는 適當한 解가 없으므로 편의상, 試驗片 直徑과 같은 板厚를 가지는 平板이 單순屈曲을 받는 경우에 成長하는 表面疲勞균열의 最深點에서의  $\Delta K_I$  를 求하였다. 이때 單純屈曲을 받는 平板表面에서 成長하는 반타원균열의 最深點( $\theta = \pi/2$ )에서의  $\Delta K_I$  는 Kobayashi 해의 式<sup>(12)</sup>을 使用하였다.

Fig. 11 에 이와 같은 方法으로 정리한 結果를 나타내며 좋은 벤드내에 資料가 모이고 있다. 또 이 그림에서 點線으로 나타낸 것은 本 研究에서와 같은 計算方法으로 구한 軟鋼의 資料<sup>(2)</sup> 로서 比較的 비슷한 傾向을 나타내고 있다.

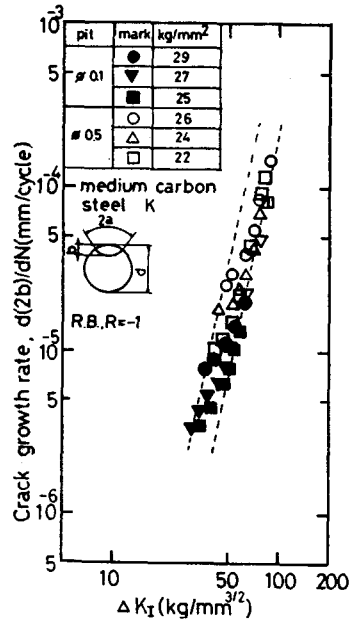


Fig. 11  $\Delta K_I - d(2b)/dN$  diagram for small surface cracks initiated from a small surfact defect (Note: the stress intensity factor ranges are calculated from the Kobayashi Eq.<sup>(12)</sup>)

## 4. 結 論

本 研究에서는 軟鋼(C-0.15%)와 中炭素鋼(C-0.45%)에 작은 人工缺陷을 加工하여 回轉굽힘疲勞試驗을 실시하여 작은 表面缺陷이 疲勞強度에 미치는 영향을 調査하였다. 또 작은 人工缺陷에서 發生·成長하는 表面疲勞균열을 조사하여 작은 表面疲勞균열에 파괴역학적 개념을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 작은 表面缺陷材에서 發生·成長하는 表面疲勞균열이 5mm 정도로 성장하였을 때의 피로반복수는 全疲勞壽命의 70~90%를 차지하였다.

(2) 疲勞強度에 미치는 작은 人工缺陷의 敏感度는 매우 크며, 템프칼러법을 사용하여 表面疲勞균열의 균열면 형상변화를 측정할 결과, 균열이 성장함에 따라 균열길이에 수반하는 형상비  $b/a$ 가 급속히 저하하여 0.6에 수렴하였다.

(3) 應力擴大係數  $K$ 를 사용하여 균열의 성장속도를 정리하면 應力依存성이 생겨 統一的인 정리가 곤란하다. 이 경우 反復全스เตร인擴大係數範圍  $\Delta K \epsilon_i$ 를 사용하므로 應力依存성과 缺陷크기의 依存성이 없어져 모든 데이터를 하나의 直線上에 나타낼 수 있었다.

## 參 考 文 獻

- (1) Kitagawa, H., S. Takahashi, C.M. Suh and S. Miyashita, "Quantitative Analysis of Fatigue Process-Microcracks and Slip Lines under Cyclic Stresses-," ASTM, STP 675, pp.420~449, 1979
- (2) 北川英夫, 徐昌敏, "小さな人工缺陷からの疲勞き裂成長舉動" 日本材料學會, 第14回 疲勞ツンポツウ前刷集, pp.26~30, 1980
- (3) EL Haddad, M.H., K.N. Smith and T.H. Topper "Fatigue Crack Propagation of Short Cracks", Trans. of ASME, J. of Engr. Materials and Technology, Vol. 101, pp.42~47, 1979
- (4) 徐昌敏, "引張軸荷重 疲勞에 의한 微小表面 균열 發生·成長舉動", 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第1號, pp.1~9, 1985
- (5) 徐昌敏, 金奎南, "SUS 304 鋼의 常溫下 表面疲勞 균열의 發生·成長舉動에 관한 연구", 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第3號, pp.195~200, 1984
- (6) 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き裂試験片の回轉曲げ試験によるき裂傳ば特性の評價", 日本機械學會論文集, 第42卷, 第354號, pp.325~333, 1976
- (7) Kawahara, M., and M. Kurihara, "A Preliminary Study on Fatigue Crack Growth from a Surface Flaw under Combined Tensile and Bending Loads", J. of Soc. Naval Architects, Japan, Vol. 137 pp. 297~306, 1975
- (8) 村上敬宜, "疲勞強度に及ぼす微小缺陷の影響", 日本機械學會論文集, 第44卷, 第388號, pp.4003~4013, 1978
- (9) 徐昌敏, 姜用求, "炭素鋼材의 작은 表面缺陷에서 成長하는 表面疲勞균열의 成長特性에 관한 研究", 대한조선학회, 第21卷, 第1號, pp.35~42, 1984
- (10) 河野博之, 村上敬宜, 遠藤達雄, "直徑 40 $\mu$ m의 微小穴から發生したき裂の成長", 日本機械學會講演論文集 800-11, pp.179~181, 1980
- (11) Kitagawa, H., C.M. Suh, Y. Nakasone and S. Takahashi, "Mechanical and Non-mechanical Categories in Fatigue Study: A Point of View for Small Surface Crack Problems", ASME Mechanics of Fatigue, AMD-Vol. 47, pp.167~184, 1981
- (12) Kobayashi, A.S., "Crack Opening Displacement in a Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending", Proc. Second Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials ASM, ICM-II, pp. 1073~1077, 1976
- (13) Wood, H.A., "Application of Fracture Mechanics to Aircraft Structural Safety", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp.557~564, 1975