

---

 論 文
 

---

大韓造船學會誌  
 第21卷 第1號 1984年 3月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 21, No. 1, March 1984

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\*

徐昌敏\*\*·姜用求\*\*\*

A Study on Growth Characteristics of the Surface Fatigue Crack  
 Propagated from a Small Surface Defect in Carbon Steels\*

by

Chang-Min Suh\*\* · Yong-Goo Kang\*\*\*

**Abstract**

In the present study, rotating bending fatigue tests have been carried out in three kinds of carbon steel specimens; an annealed low carbon steel, an annealed high carbon steel and quenched-tempered high carbon steel; with a small artificial surface defect that might exist in real structures.

Fatigue crack lengths have been observed by a method of replication in order to investigate the growth characteristic of fatigue crack in the viewpoints of strength of materials and fracture mechanics.

The main results obtained are as follows:

- 1) The effect of a small surface defect upon the reduction of fatigue limit is considerably large, and the rate of fatigue limit reduction grows in the following order; annealed low carbon steel (mild steel), annealed high carbon steel, quenched-tempered high carbon steel.
- 2) When the growth rate of surface crack length( $2a$ ) was investigated in the viewpoints of fracture mechanics based upon  $\Delta K_{\epsilon}$ , the dependence of stress level and of surface defect size disappear, and there exists a linear relationships between  $d(2a)/dN$  and  $\Delta K_{\epsilon}$ ,  $\Delta \epsilon_t \sqrt{\pi a}$  on log. log. plot, i.e.  $d(2a)/dN = C \cdot \Delta K_{\epsilon}^3$ , where  $\Delta \epsilon_t \sqrt{\pi a}$  is the cyclic total strain intensity factor range.

**1. 序 論**

部材에 表面缺陷 또는 介在物이 存在할 경우 疲勞限度 以上の 反復應力을 받으면 그곳에 應力이 集中되어 疲勞균열이 發生하고, 이는 서서히 증가하여 어떤 臨界길이까지 成長하면 갑자기 破斷된다. 따라서 構造

物이나 機械部品은 그 表面에 存在 가능한 작은 表面缺陷에서 發生한 表面 疲勞균열이 이의 破壞原因으로 주로 分析됨에 따라, 작은 表面缺陷에서 發生·成長하는 表面균열(surface crack)의 成長舉動에 관한 研究는 最近, 그 工學的 및 工業的 重要性이 더욱 인식되어 疲勞破壞의 방지책으로 중요한 研究 對象이 되고 있다. 最近, 破壞力學의 適用 범위가 확장되고 또한 非破壞

接受日字: 1983年 11月 12日, 再接受日字: 1983年 12月 13日

\* 本論文은 1982年 11月 5日 서울大學校 教授會館에서 開催되었던 學會秋季學術講演會에서 發表되었던 論文임.

\*\* 正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

\*\*\* 慶北大學校 大學院, (現)金烏工科大學 機械工學科

檢査 技術의 發達과 더불어 部材의 檢査, 保守 및 安全性 評價를 위하여 작은 表面缺陷에서 發生·成長하는 疲勞균열의 데이터가 절실히 要求 되고 있다.

그러나 종래의 研究對象으로는 주로 貫通 大균열에 關하여 많이 研究 되었으며 또한 部材가 引張 軸方向 疲勞 荷重을 받는 경우에는 應力擴大係數範圍,  $\Delta K$ 로써 疲勞균열의 成長舉動이 잘 整理되고 있다. [1]

그러나, 回轉굽힘 反復應力을 받고 있는 경우, 表面缺陷에서 發生·成長하는 表面 疲勞균열은 應力擴大係數,  $K$ 의 式을 精確히 유도할 수 없기 때문에 破壞力學的으로 研究된 예는 거의 없다. 그렇지만 回轉굽힘 應力을 받는 軟鋼平滑材의 微小表面균열의 成長速度를  $\Delta K$ 로 表示하면 應力依存性이 發生한다는것과, 이를 彈塑性관계에서 成立하는 安定된 반복 스트레인 값을 使用한 반복 스트레인擴大係數範圍(cyclic strain intensity factor range)  $\Delta K_e$ 로 정리한 結果  $\Delta K$ 로 整理할 때 생긴 應力依存性이 소멸되어 統一的인 整理가 可能함을 알았다. [2][3]

따라서 本 研究에서는 鋼平滑材에서 적용 가능한  $\Delta K_e$ 를 回轉굽힘應力을 받는 작은 人工表面缺陷材에 확장시킬 목적으로 軟鋼과 硬鋼의 두 炭素鋼材에 實存 가능한 작은 表面缺陷을 人工的으로 가공하여 回轉굽힘 實驗을 실시한다. 또한 이 疲勞試驗을 통하여 各 應力 레벨에서의 表面균열길이 및 全스트레인의 量의 變化를 精確하게 測定하여 작은 人工表面缺陷이 疲勞限度에 미치는 영향과 세 가지의 試驗片과 세 가지 크기의 表面缺陷에서 發生·成長하는 疲勞균열의 成長特性을 검토하며, 그 成長舉動을 破壞力學的의 파라메터를 使用한  $\Delta K$  및  $\Delta K_e$ 으로 정리하여 이를 서로 비교 검토한다.

2. 實 驗

2.1 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗片의 材料는 軟鋼(S15C, G材라 칭함)과 硬鋼(SW RH72B, J材라 칭함)의 두 種類의 直徑 16mm 炭素鋼棒으로 그 化學成分은 Table 1과 같다. 疲勞試驗片은 G材는 Fig. 1-b, J材는 Fig. 1-a와 같은 크기로 機械加工한 후 總까지 800번까지 研磨하였다. 研磨가 끝난 試驗片中 작은 表面缺陷에서 發生·成長하는 疲勞균열의 成長舉動을 조사할 試驗片은 試驗片 平滑平行部 中央表面上에 다이알 게이지를 부착한 소형 고속 드릴링머신으로 가공하고 그 가공정도는 表面레프리카(replica) 및 광학현미경으로 확인하여 그 가공정밀도가 +4% 오차범위인 試驗片만을 實驗에

Table 1. Chemical composition (wt. %)

| Material    | Comp. | C    | Si   | Mn   | P     | S     |
|-------------|-------|------|------|------|-------|-------|
| G (S15C)    |       | 0.15 | 0.26 | 0.55 | 0.022 | 0.021 |
| J (SWRH72B) |       | 0.73 | 0.34 | 0.76 | 0.021 | 0.024 |

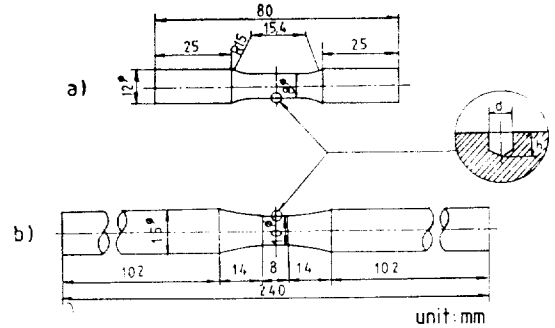


Fig. 1 Configurations of the specimens and the pits,

a) specimen for high carbon steel J

b) specimen for mild steel G

使用하였다.

人工缺陷은 材料에 따라 그 形狀이 疲勞限度와 疲勞균열 成長特性에 미치는 영향을 파악하기 위하여 G材에서는 人工缺陷의 깊이를 세 가지로 變化시켰으며, J材는 熱處理 方法을 달리하여 機械的 性質을 變化시켰다. 즉, G材는 直徑 0.5mm 對하여 깊이를 0.23mm, 0.5mm, 1.0mm의 세 가지 人工缺陷을 가공 하였다. J材는 同一크기의 人工缺陷(直徑 0.5mm, 깊이 0.5mm)을 加工하여 어닐링 및 퀴칭-템퍼링의 두 가지 熱處理를 行하여, 試驗片의 機械的 性質을 變化시켰으며 이를 各各 J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材라 칭한다. 또한 G材는 表面缺陷을 加工한 후, 加工에 의한 잔류응력을 열처리방법에 의하여 제거 시켰다.

Table 3에는 試驗片의 熱處理 溫度 및 그 조건을 나타내며, Table 2에는 各 試驗片의 機械的 性質을 나타낸다. 이상과 같은 表面缺陷의 加工 및 熱處理를 끝낸

Table 2. Mechanical properties

| Material | Yielding point (kg/mm <sup>2</sup> ) | Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> ) | Elongation (%) | Reduction of area (%) | Hv   |     |
|----------|--------------------------------------|--|----------------|-----------------------|------|-----|
| G        | 24.5                                 | 40.1                                   | 40.3           | 69.3                  | 114  |     |
| J        | J <sub>1</sub>                       | 32                                     | 55             | 22.5                  | 40   | 170 |
|          | J <sub>2</sub>                       | 110.2                                  | 124.4          | 12                    | 23.2 | 383 |

Table 3. Conditions of heat-treatment and notch condition

| Material       | Conditions of heat-treatment  | Notch condition      |
|----------------|---|----------------------|
| G<br>(S15C)    | held 60 min. at 930°C and furnace-cooled  | 0.5mmφ, depth 0.23mm |
|                |   | " , 0.5mm            |
|                |   | " , 1.0mm            |
| J<br>(SWRH72B) | J <sub>1</sub> held 60 min. at 780°C and furnace-cooled   | 0.5mmφ, depth 0.5mm  |
|                | J <sub>2</sub> tempered for 60 min at 480°C and then water cooled which was pre-oil quenched at 830°C |                      |

試驗片은 연마지 1000번에서 1200번까지 가볍게 再研磨시킨 후 酸化크롬분말로써 버핑을 행하였다.

2.2 實驗方法

Table 3과 같이 製作된 세 種類의 試驗片은 一定荷重下에서 小野(Ono)式 回轉 굽힘疲勞試驗機에 의하여 常溫에서 疲勞試驗을 실시하였다. 表面 疲勞균열의 測定은 一定 回轉數마다 試驗機를 정지 시켜 表面레프리카를 採取하고, 이 表面레프리카를 광학현미경을 使用하여 높은 精密度로 測定하여 表面균열길이(2a)를 測定하였다.

또한 응력-변형률 히스테리시스曲線(stress-strain hysteresis curve) 및 全 스트레인범위 (total strain range)는 試驗片 균열 測定部와 反對側の 平滑平行部 中央에 스트레인게이지 (게이지길이 1mm)를 附着하여 測定하였다. 破斷壽命의 20% 以前の 段階에서는 破斷壽命의 3~5% 段階마다, 또 그 以後에서는 破斷壽命의 10% 段階마다 勞務試驗機를 靜止시켜, 스트레인 게이지를 靜의 스트레인 測定機에 연결시킨 후, 10°씩 수동으로 試驗片을 回轉시켜 變化하는 全 스트레인의 값과 應力值를 얻고 이를 方眼紙에 플롯트하여 응력-변형률 히스테리시스 곡선을 구하였다. 이 곡선에서 疲勞壽命의 10~20% 以後에서 얻을 수 있는 安定화된 全 스트레인 범위를 測定하여 ΔK<sub>cr</sub>를 계산하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 S-N 特性

本 實驗에 使用된 G材, J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材의 平滑試驗片과 피트형 人工缺陷材의 回轉 굽힘 疲勞試驗에서 구한 S-N 特性을 Fig. 2에 나타낸다. 또한 G材, J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材 平滑試驗片과 表面缺陷에 따른 疲勞限度 및 疲勞限度減少率을 Table 4에 나타내었다. G材의 平滑試驗片의 疲勞限度는 20kg/mm<sup>2</sup>이며, 피트형 表面缺陷이 直徑 0.5mmφ에다 그 깊이가 0.23mm, 0.5mm 및 1.0mm

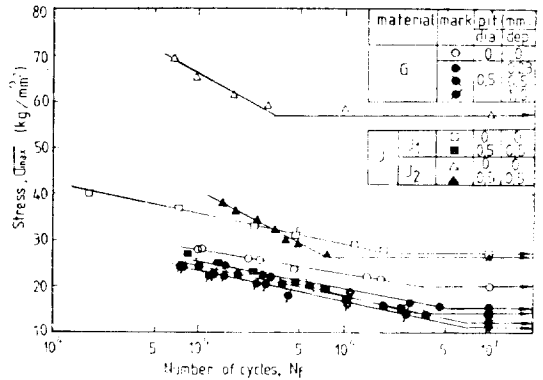


Fig. 2 S-N curves for mild steel G and high carbon steel J

인 경우 疲勞限度는 各各 14kg/mm<sup>2</sup>, 12kg/mm<sup>2</sup> 및 11 kg/mm<sup>2</sup>로 되어 疲勞限度減少率은 0.3, 0.4, 0.45로 커지고 있다. J<sub>1</sub>材와 J<sub>2</sub>材의 平滑試驗片의 疲勞限度는 28kg/mm<sup>2</sup> 및 57kg/mm<sup>2</sup>이며 直徑 0.5mmφ, 길이 0.5 mm의 피트형 表面缺陷을 가진 시험편의 경우, 疲勞限度는 各各 14kg/mm<sup>2</sup> 및 26kg/mm<sup>2</sup>으로 되어 缺陷에 의한 疲勞限度減少率은 各各 0.5, 0.546으로 증가하였다. 이와 같은 結果는 熱處理方法에 따라 強度 및 硬度가 커진 材料는 表面缺陷에 의한 疲勞限度減少率이 커진다는 것을 의미한다.

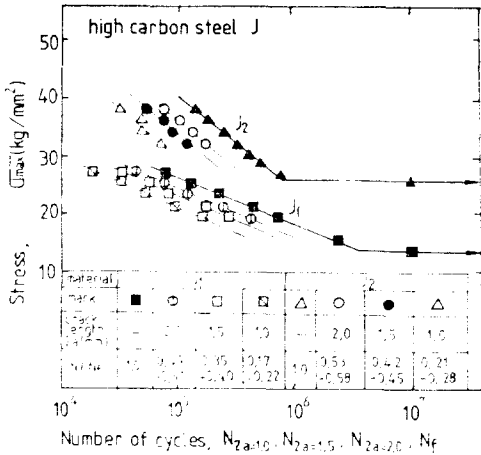
또한 直徑 0.5mmφ, 길이 0.5mm의 피트형 人工缺陷을 가진 G材, J<sub>1</sub>材, J<sub>2</sub>材의 疲勞限度減少率을 살펴보면 各各 0.4, 0.5, 0.546으로 커짐을 알 수 있다. 이와같이 작은 人工缺陷의 疲勞限度에 미치는 영향은 대단히 크며 強度가 큰 材料일수록 缺陷이 疲勞限度저하에 미치는 영향이 크다는 村上등[4]의 結果와도 일치한다.

3.2 人工缺陷材의 疲勞균열 成長特性

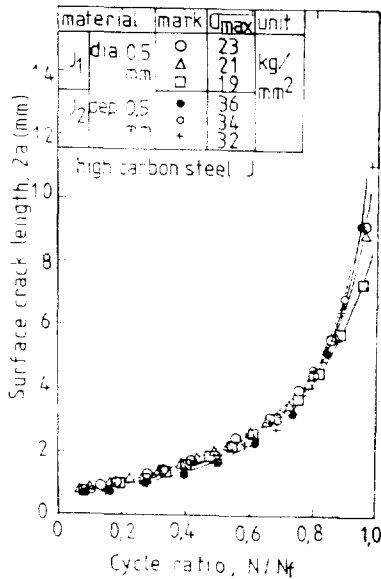
G材, J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材의 세 가지 試驗片의 表面缺陷으로 부터 發生·成長하는 疲勞균열의 成長擧動을 검토

**Table 4.** The rate of fatigue strength of notched specimens to that of smooth specimens

| Material | Conditions of notch        | Fatigue strength of smooth specimen ( $\sqrt{w_s}$ )(kg/mm <sup>2</sup> ) | Fatigue strength of notched specimen ( $\sqrt{w_N}$ )(kg/mm <sup>2</sup> ) | $1 - (\sqrt{w_N}/\sqrt{w_s})$ |
|----------|----------------------------|---|--|-------------------------------|
| G        | 0.5mm $\phi$ , depth 0.5mm | 20  | 12   | 0.400                         |
|          | " , 0.23"                  | "   | 14   | 0.300                         |
|          | " , 1.0 "                  | "   | 11   | 0.450                         |
| J        | J <sub>1</sub> " , 0.5 "   | 28  | 14   | 0.500                         |
|          | J <sub>2</sub> " , 0.5 "   | 57  | 26   | 0.546                         |



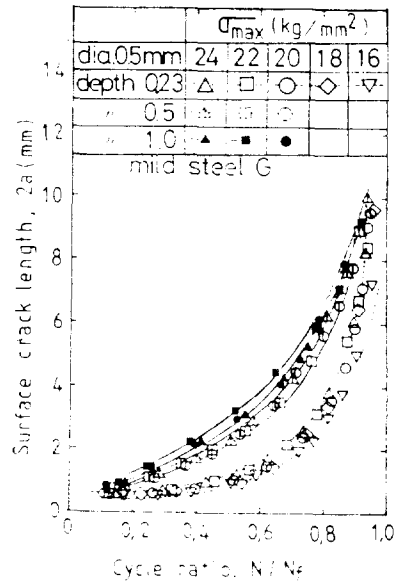
**Fig. 3** The number of cycles for the crack length at various stages of fatigue life



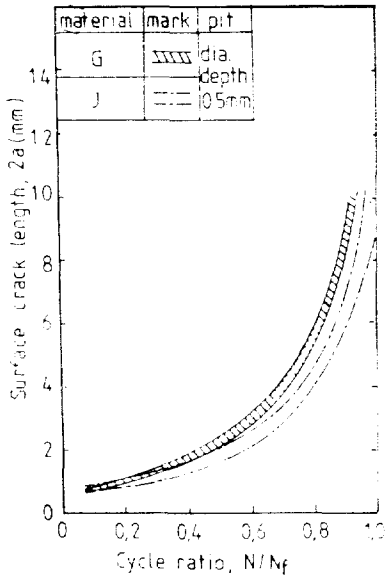
**Fig. 4** Relation between surface crack length and the cycle ratio for mild steel G

하기 위하여 各 試驗片의 各各의 應力레벨에서 疲勞균열의 길이가 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm로 되는 等균열길이곡선(equi-crack length curve)을 作成하여 S-N<sub>f</sub> 선도에 중첩시킨 一例를 Fig. 3에 나타낸다. 그림에서 各 試驗片에서 같은 크기의 疲勞균열길이를 나타내는 等균열길이 곡선은 破斷壽命(N<sub>f</sub>)線圖와 거의 平行한 直線으로 나타낼 수 있었다. 이와같은 等균열곡선의 特性은 應力레벨에 관계 없이 같은 반복수비(N/N<sub>f</sub>)에서는 거의 같은 疲勞균열길이가 된다는 것을 意味한다. 이와 유사한 特性은 軟鋼(S15C) 平滑材의 경우에도 보고 되어있다[5].

또한 表面疲勞균열길이(2a)와 반복수비와의 관계를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내며 Fig. 4는 軟鋼 G材의 데이터이고 Fig. 5는 熱處理方法을 달리한 J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材의 데이터를 나타낸다. Fig. 4와 Fig. 5에서 균열길이



**Fig. 5** Relation between surface crack length and the cycle ratio for high carbon steel J



**Fig. 6** Relation between surface crack length and the cycle ratio for mild steel G and high carbon steel J under the same conditions of pits

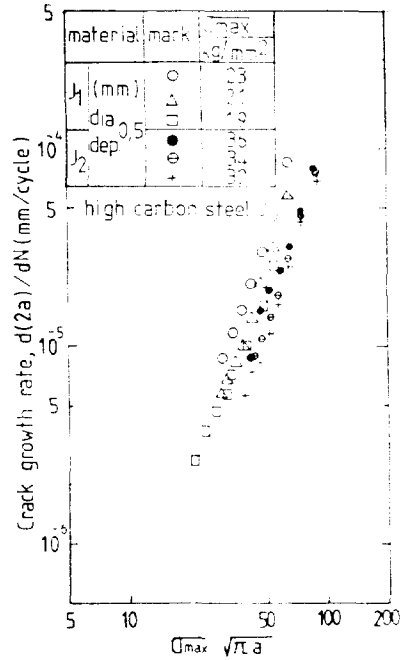
는 피트형 人工缺陷의 길이 별로 應力레벨에 따른 應力依存性은 거의 없어지고 좁은 밴드내에 모여 반복수비와 더불어 원활하게 증가하고 있다.

Fig. 4에서 缺陷의 깊이가 클수록 균열發生 初期의 成長速度가 빨라짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서는 熱處理에 따라 Table 2와 같이 機械的 性質이 크게 變化 함에도 불구하고 J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材 데이터가 대부분 좁은 밴드내에 모여 반복수비에 따라 원활하게 성장하고 있다. 그러나 J<sub>1</sub>材가 J<sub>2</sub>材보다 균열발생초기의 成長速度는 다소 늦은 경향이 있지만 후반부에서는 빨라지는 경향을 보이고 있다. 또한 軟鋼의 G材와 硬鋼의 J材上에서 發生·成長하는 疲勞균열의 成長特性을 비교하기 위하여 직경 0.5mm<sup>φ</sup>, 길이 0.5mm의 缺陷을 가진 데이터만을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 두 材質 사이에는 큰 차이가 없고 비교적 비슷한 원활한 성장곡선을 나타내고 있다.

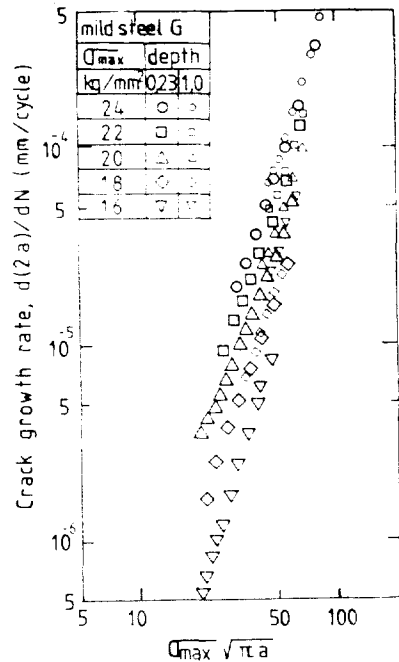
#### 4. 表面疲勞균열 成長速度의 破壞力學的 整理

##### 4.1 應力擴大係數의 整理에 따른 應力依存性

피트형 人工表面缺陷으로부터 發生하여 單獨으로 成長, 破斷에 이르는 表面균열의 成長特性을 應力擴大係



**Fig. 7** Crack growth rate versus  $\sqrt{\sigma_{max}} \sqrt{\pi a}$  for mild steel G



**Fig. 8** Crack growth rate versus  $\sqrt{\sigma_{max}} \sqrt{\pi a}$  for high carbon steel J

數範圍  $\Delta K$ 와 균열成長速度  $d(2a)/dN$ 의 관계로 兩對數紙上에 플롯하여 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타낸다. 이때 균열發生直後는 人工缺陷에 의해 균열의 成長이 영향을 받으므로 表面균열길이 0.8mm으로부터 플롯하였다.

Fig. 7, 8에서 G材 및 J材의 一定應力레벨에서의  $\log(\sigma_{max}\sqrt{\pi a})$ 와  $\log(d(2a)/dN)$ 의 關係는 거의 直線의이고 應力레벨의 차 域에 缺陷의 깊이, 熱處理에 의한 영향등에 따라 여러개의 平行한 直線으로 되었다. 따라서 이와같은 應力依存性에 의하여 回轉굽힘應力下에서의 表面缺陷에서 發生·成長하는 表面균열의 成長特性은  $\Delta K$ 로서는 統一의인 整理가 불가능함을 알 수 있다. 따라서 應力依存性 및 缺陷形狀에 따른 依存性을 없애기 위하여 安定된 全스트레인범위  $\Delta\epsilon_t$ 를 사용한 反復스트레인 확대계수범위  $\Delta K\epsilon$ 를 사용하여 兩對數紙上에 整理하여 보기로 한다. 이  $\Delta K\epsilon$ 에 의하여 軟鋼平滑材 表面上에서 發生·成長하는 微小表面균열은 統一의인 破壞力學的 整理가 可能함이 보고되고 있다[2], [3].

4.2 응력-변형률 히스테리시스 곡선

4.2.1  $N/N_f - \Delta\epsilon_t$ 의 變化

一定應力下에서 疲勞試驗中, 反復回轉數에 따라 變化하는 스트레인 값을 測定하였다. 이 스트레인 값들 중에  $\Delta\epsilon_t$ 의 測定데이터의 變化를 一例로서 Fig. 9,

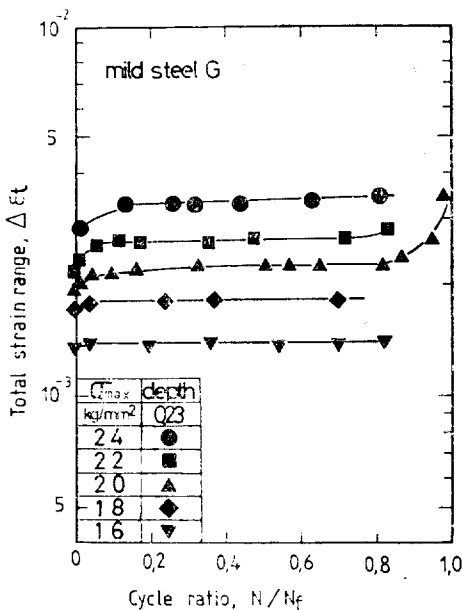


Fig. 9 Stabilization of cyclic total strain range,  $\Delta\epsilon_t$ , in the early stage of fatigue life for mild steel G

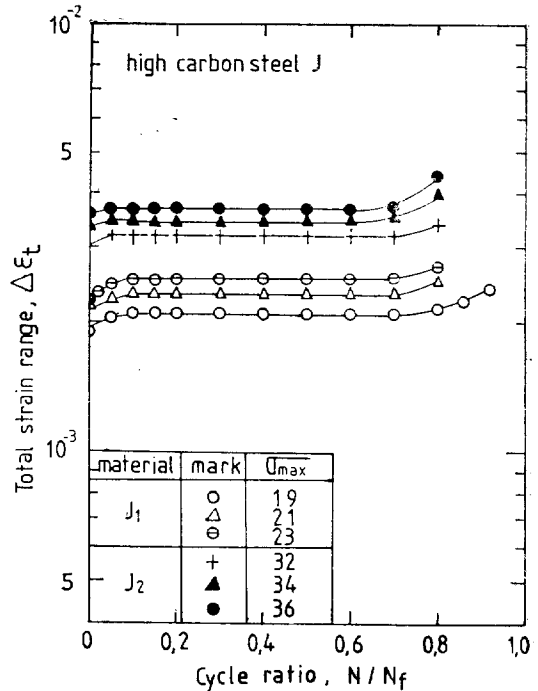


Fig. 10 Stabilization of cyclic total strain range,  $\Delta\epsilon_t$ , in the early stage of fatigue life for high carbon steel J

Fig. 10에 나타낸다. Fig. 9는 G材중 直徑 0.5mm, 길이 0.23mm의 缺陷材의 데이터이며 Fig. 10은 J材의 것이다. Fig. 9, 10에서 알 수 있는 바와 같이 G材 및 J材 모두 全스트레인범위  $\Delta\epsilon_t$ 가 安定된 값을 취하는 時期는 빠르게 疲勞壽命의 약 20% 以前에서 安定된 값을 취하고 있다. 또한 G, J材는 모두 疲勞壽命의 初期段階(약 20% 以前)에서는 全스트레인 범위가 증가하는 경향을 나타내고 있으며 이는 材料가 反復應力에 의하여 試驗片表面이 점차 硬化현상이 일어나기 때문이라고 생각된다[6]. 또한 疲勞壽命의 後期 즉,  $N/N_f \approx 0.8$ 以後에서는 全스트레인 범위  $\Delta\epsilon_t$ 가 다시 상승하는 경향을 취하는데 이는 表面균열 길이가 비교적 크게 成長되었기 때문에 COD(crack opening displacement)에 의한 컴플라이언스(compliance)의 影響에 起因한다.

따라서 다음절의 表面疲勞균열의 破壞力學的 解析에 사용할  $\Delta\epsilon_t$ 의 값은 Fig. 9, Fig. 10에서 疲勞壽命의 약 20%以後인 安定된 全스트레인 범위  $\Delta\epsilon_t$ 의 값을 취하여 各各의 應力레벨에서  $\Delta K\epsilon_t (= \Delta\epsilon_t \sqrt{\pi a})$ 를 계산한다.

4.2.2 反復應力 變形率 曲線

Fig. 11, 12는 各各 G材 및 J材의 반복응력-변형률 곡선을 나타낸다. 이것은 multiple step method[7]에

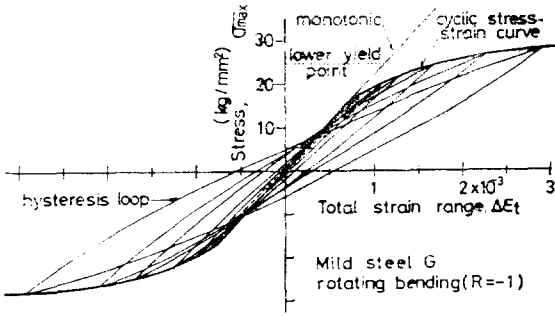


Fig. 11 Cyclic stress-strain curve obtained from stable hysteresis loops by multiple step method for high carbon steel G

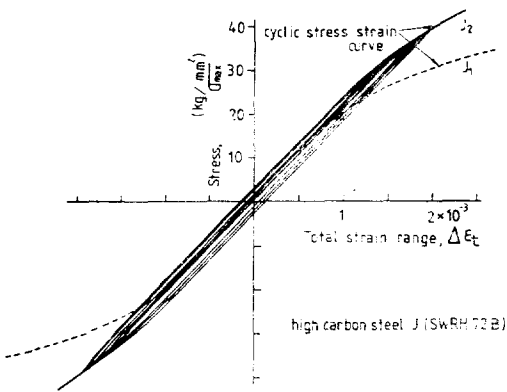


Fig. 12 Cyclic stress-strain curves obtained from stable hysteresis loops by multiple step method for high carbon steel J

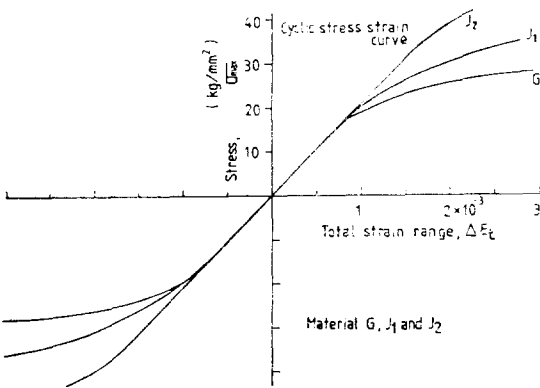


Fig. 13 Cyclic stress-strain curves for mild steel G and high carbon steel J

의하여 하나의 試驗片에서 應力레벨을 점차적으로 變化시켜 가면서 各 應力레벨에서 얻어지는 安定된 히스테리시스 曲線을 얻어서 이 곡선의 끝을 연결시킨 曲

線이다.

Fig. 13은 G材, J<sub>1</sub> 및 J<sub>2</sub>材의 反復應力 變형률 曲線을 동시에 나타낸 것으로서 強度가 큰 試驗片일수록 應力과 스트레인의 관계가 直線인 部分이 길어지던데서 높은 應力에서도 낮은 全 스트레인 값을 취하고 있다. 또한 Fig. 13은 한개의 試驗片에 一定應力 레벨上에서 實驗을 실시하여 全 스트레인범위 Δεt의 變化를 구한 Fig. 9, Fig. 10의 Δεt의 값과도 잘 一致하고 있다.

#### 4.3 反復 全스트레인 擴大係數범위 ΔKεt 에 의한 整理

앞절에서 설명한 安定된 全스트레인 범위 Δεt를 使用하여 計算한 G材 및 J材의 log(ΔKεt)와 log(d(2a)/dN)의 關係를 플롯트하여 Fig. 14 및 Fig. 15에 나타낸다. Fig. 14에서 G材에 대하여 고찰해보면, 균열成長速度, d(2a)/dN,를 ΔKεt로 整理함에 따라 Fig. 7에서와 같이 ΔK로 整理했을때 생긴 應力레벨에 따른 依存性 및 缺陷의 形狀에 따른 차이는 거의 없어지고 거의 모든 데이터가 좁은 밴드내에 모여 통일적인 整理가 가능함을 알 수 있다. Fig. 15에서 J材에 대하여 고찰하면 Fig. 8에서와 같이 ΔK로 整理했을 때 發生한 應力依存性和 熱處理方法의 差이에 의한 材質의 變化에 따른

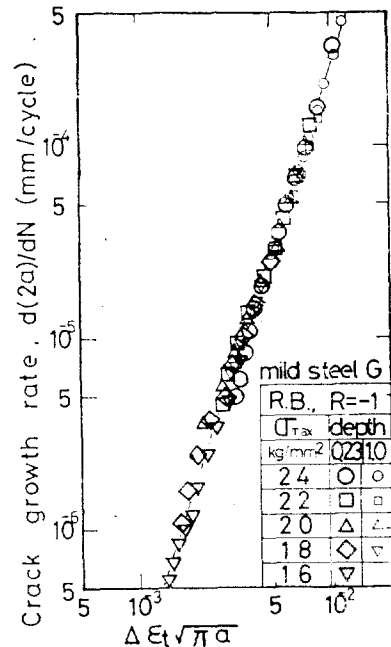


Fig. 14 Dependence of the growth rate of small surface fatigue cracks upon the cyclic strain intensity factor range for mild steel G

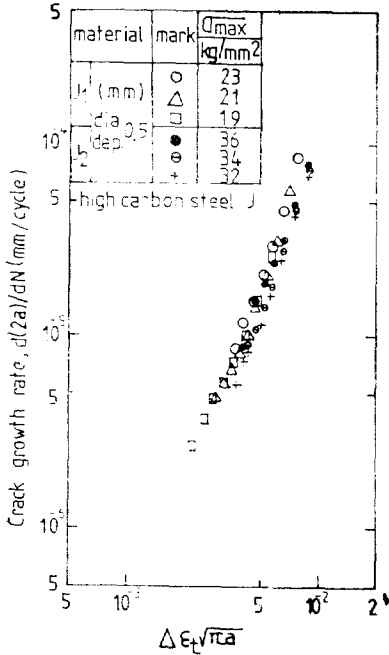


Fig. 15 Dependence of the growth rate of small surface fatigue cracks upon the cyclic strain intensity factor range for high carbon steel J

차이는 거의 없어지고 J<sub>1</sub>材 및 J<sub>2</sub>材의 거의 모든 데이터가 좁은 밴드내에 모여 있음을 알 수 있다.

이와같은 사실은 軟鋼 및 硬鋼材料에 있어서 작은 表面缺陷에서 成長하는 疲勞균열의 成長速度는 材質 및 表面缺陷의 크기나 形狀에 관계없이 統一的인 하나의 式  $d(2a)/dN = C \Delta K \epsilon_s^3$

으로 나타낼 수 있으며 상수 C의 값은 材質에 따라 약간의 차이를 나타내고 있다. Fig. 14와 Fig. 15의 實驗 데이터에서 C값의 범위를 구한즉 다음과 같다.

軟鋼 G材 :  $3.175 \times 10^{-3} \sim 2.778 \times 10^{-3}$

硬鋼 J<sub>1</sub>材 :  $2.632 \times 10^{-3} \sim 2.381 \times 10^{-3}$

硬鋼 J<sub>2</sub>材 :  $2.299 \times 10^{-3} \sim 2.151 \times 10^{-3}$

### 5. 結 論

實構造物에 存在 가능한 세가지 종류의 작은 人工表面缺陷을 軟鋼材에 加工하고 두 가지 熱處理方法을 달리한 硬鋼材를 常溫에서 回轉굽힘 疲勞試驗을 실시하여 材料强度的 側面과 破壞力學的 견지에서 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 작은 表面缺陷이 疲勞限度 低下에 미치는 영향은 상당히 컸으며 軟鋼(S15C材), 硬鋼을 연화시킨 材料, 硬鋼을 경화시킨 材料의 順으로 그 저하정도가 커졌다.

2) 人工缺陷으로부터 發生·成長하는 表面疲勞균열의 균열成長速度를 反復스트레인 擴大係數  $\Delta K \epsilon_s$ 을 使用하여 破壞力學的인 方法으로 整理한 結果, 軟鋼 및 硬鋼材에 대하여 表面缺陷의 크기나 材質 및 應力에 대한 依存性이 거의 없어지고 統一的인 하나의 式으로 表示할 수 있었다. 즉

$$d(2a)/dN = C \cdot \Delta K \epsilon_s^3$$

이와 같은 事實을 炭素鋼 外的의 여러가지 材料에 대해서도 回轉굽힘應力을 받을 경우  $\Delta K \epsilon_s$ 을 使用함에 따라 統一的으로 破壞力學的 整理가 可能함을 시사하고 있다.

### 參 考 文 獻

- [1] David Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Sijthoff & Noordhoff, pp.18-23, 1978.
- [2] 北川英夫, 徐昌敏, 軟鋼平滑材의 回轉굽힘 및 片振り引張り 疲勞における 微勞き裂의 成長學動(平滑材의 破壞力學的 解析), 日本材料學會의 第13回 疲勞 Symposium, pp.10-14, 1979.
- [3] Kitagawa, H., S. Takahashi, C.M. Suh and S. Miyashita, "Quantitative Analysis of Fatigue Process-Micro-Cracks and Slip Lines under Cyclic Strains", ASTM, STP 675, pp.420-449, 1979.
- [4] 村上敬宜, 遠藤達雄, 河野博之, 疲勞強度에 及ぼす 人工微小缺陷의 影響, 日本機械學會論文集, 第45-400, pp.1479-1486, 1979.
- [5] 北川英夫, 結城良治, 徐昌敏, 平滑材의 微小疲勞き裂의 發生·成長의 破壞力學的 研究, 東京大生産技術研究所, 生産研究, 第32-1, pp.31-34, 1980.
- [6] Sandor Bela. I, "Cyclic stress and strain", The University of Wisconsin Process, pp.17-38, 1978.
- [7] Landgraf. R.W., Morrow Jodean and J. Endo, "Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve", Journal of Material, Vol. 4-1, pp.176-188, 1969.