

<論 文>

微小圓孔 및 微小슬릿材의 疲勞크랙 傳播舉動

—高周波 熱處理材의 경우—

宋 森 弘* · 尹 命 辰**

(1985年 9月 7日 接受)

Behavior of Fatigue Crack Propagation of Micro-Hole and Micro-Slit Specimens

—For High-Frequency Heat Treatment Specimens—

Sam Hong Song and Myung Jin Yoon

Key Words; High-Frequency Heat Treatment(高周波 熱處理), Micro-Hole(미소원공), Micro-Slit(미소슬릿), Tip of Defect(결함의 先端), Crack Propagation Rate(疲勞크랙 傳播速度)

Abstract

This Study has been made to investigate Behavior of the fatigue crack propagation for the purpose of taking into consideration the fatigue behavior Which initiate and propagate in tip of defect of the defected specimens, Which Contain the micro-hole or micro-slit. Especially, the specimens have been conducted with high-frequency heat treatment of 850°C, 1050°C to consider strength elevation of defected specimens.

The results of this study are as follow;

(1) The case of the same in the length of crack, the fatigue crack propagation rate of the micro-slit is always faster than that of micro-hole.

But, the first step of the fatigue crack propagation it is not always so.

(2) Fatigue crack propagation rate of specimens with micro-slit or micro-hole which have been treated with high-frequency heat treatment satisfy the following formula between the fatigue crack propagation rate and nominal stress; $dl/dN \propto \sigma^n \cdot l^n$.

1. 序 論

微小缺陷을 갖는 材料의 疲勞強度는 缺陷을 갖지 않

는 材料에 比해서 強度가 低下하는 것은 잘 알려진 사실이다⁽¹⁻³⁾. 이러한 사실에 입각하여 微小원공을 가진 各種材料에서 發生, 成長하는 表面크랙이나 内部크랙에 대한 研究가 많이 發表되고 있다. 그 例로서 西谷等⁽⁴⁾은 直徑과 깊이를 0.3mm 되게 一定하게 加工한 원공의 人工缺陷材의 疲勞크랙 傳播速度를 광범위한 材料에 대해 실험을 하여 검토하고 이를 토대로 해서

* 正會員, 高麗大學校 工科學 機械工學科

** 正會員, 慶北開放大學 機械工學科

滑試驗片의 疲勞壽命을 推定하려는 研究가 있었고, 또 그들은⁽⁵⁾ 上記 研究와 同일한 人工缺陷을 가진 Fe-3% Si 合金材의 疲勞크랙 傳播速度를 크랙先端의 塑性領域을 測定하여 계산하는 方法을 提案하기도 하였다.

北川等⁽⁶⁾은 人工缺陷의 直徑과 깊이를 50 μm 으로 一定하게 加工하여 광범위한 應力下에서의 크랙傳播過程을 均열面의 形狀變化와 notch材, 平滑材의 疲勞限度를 기준으로 疲勞크랙傳播法測을 線形破壞力學으로 整理하고 그 成立限界를 檢討한 研究가 있다.

한편 슬릿을 갖는 材料에 대한 研究로서 幡中等⁽⁷⁾은 回轉굽힘 應力下에서 슬리브 링(sleeve ring)을 제작하여 슬릿을 가진 시험편의 表面스트레인을 測定하여 反復應力-變形率曲線을 사용한 微小크랙의 進展速度를 J적분에 의해 정리하는것을 試圖하였다.

또 末吉等⁽⁸⁾은 亞共析 흑연강에 미소슬릿 및 미소원공의 人工缺陷을 가진 시험편에 負荷되는 應력을 降伏強度의 60% 以下의 應力에서 反復하여 크랙傳播特性을 應力擴大係數에 의한 整理가 可能하다고 하였고, 그 以上의 應力反復에 의한 크랙傳播速度는 공칭應력과 크랙깊이의 指數法則으로 表現하는 것이 타당하다고 하였다.

그 외에도 同一한 缺陷을 가진 試驗片의 直徑이 다를 경우의 치수효과⁽⁹⁾과 同一한 원공 및 슬릿材의 斷面形狀의 變化에 따른 크랙傳播學動의 차이⁽¹⁰⁾등의 研究를 찾아 볼 수 있다.

그러나 微小缺陷이 疲勞크랙傳播에 미치는 영향은 缺陷의 種類, 모양, 크기, 位置, 微視組織과의 관계등 多樣한 영향 因子를 내포하고 있으므로 統一된 견해는 이루어 지지 않았다⁽¹¹⁾.

따라서 本 研究에서는 缺陷材의 缺陷先端에 發生 傳播하는 疲勞學動을 검토하기 위해서 미소원공과 미소슬릿을 加工하고, 이것들의 疲勞限度를 기준으로 해서 이들 缺陷의 形狀이 疲勞크랙 傳播特性에 미치는 영향을 상세히 老察하고자 한다.

2. 實驗方法

試驗片의 素材는 Table 1의 化學成分을 가진 構造用炭素鋼材이고, 이것을 材料로하여 加工한 試驗片의 치수 및 形狀은 Fig. 1과 같다. 試驗片은 3種類로 구분하여 (a) 素材, (b) 850°C 高周波 熱處理材, (c) 1050°C 高周波 熱處理材를 준비하였고 各各의 組織狀態는 Fig. 2에 表示한것과 같다. 또 이들의 熱處理條件 및 機械的 性質은 Table 2와 같다. 素材 및 高周波 熱處

理된 試驗片에 미소원공 및 미소슬릿을 加工하였다. 미소원공 및 미소슬릿은 최대한 精密度를 유지하기 위해 서 원공은 최대회전속도 12,000 r.p.m의 고속삭상 드릴링머시인에 다이알게이지를 부착하여 깊이를 測定하면서 加工하였고 원공의 直徑은 0.3 mm 드릴을 사용하여 加工한후 현미경에서 精密度를 확인하였고, 미소슬릿은 放電加工機에 시험편을 고정하고 와이어(wire)와 시험편의 접촉점을 1 μm 까지 조절하여 0.3 mm를 自動피이드되게하여 加工하였다. Fig. 3은 미소원공 및 미소슬릿의 모양을 현미경에서 촬영한 것이다. 그리고 試驗機는 3,400 r.p.m의 小野(One)型 回轉굽힘 疲勞試驗機(10kg-m)를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition

Chemical composition					
Material	C	Si	Mn	P	S
Mild steel	0.17	0.25	0.29	0.022	0.013

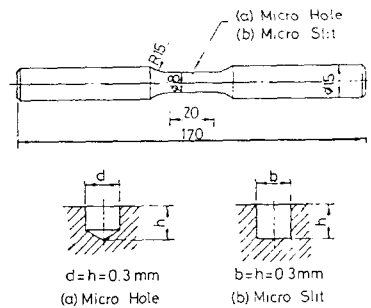
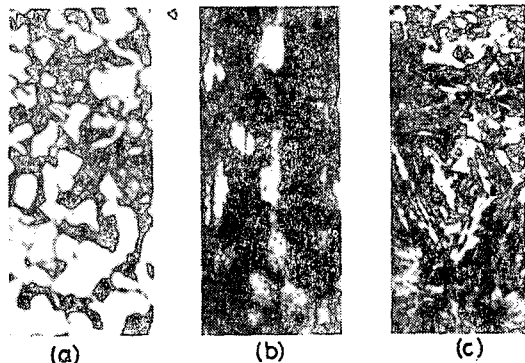


Fig. 1 Geometry of Specimen



(a) Base metal(A series)
 (b) 850°C high frequency heat treatment(B series)
 (c) 1050°C high frequency heat treatment(C series)

Fig. 2 Micro structure by etching

Table 2 Heat treatment condition Mechanical properties

Specimen No. Slit(Hole)	High frequency heat treatment condition	Feeding velocity (cm/sec)	Micro-Vickers hardness (surface)	Yielding strength (kg·f/mm ²)	Tensile strength (kg·f/mm ²)	Elongation (%)	Cross head speed (mm/min)
A(A')	—	—	275	32	49.6	37.6	3
B(B')	850°C	1.4	470	57	89.1	33	
C(C')	1050°C	0.8	496	64	98.1	30.5	

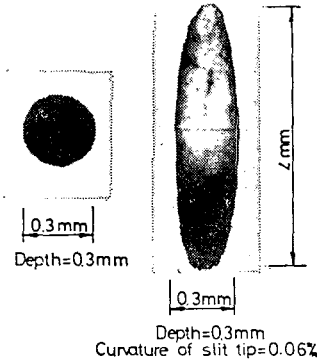


Fig. 3 Illustration of micro hole and micro slit

3. 實驗結果 및 考察

3.1 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞限度와 노치계수

本節에서는 同一한 材料라 하더라도 高周波 熱處理를 한 노치材와 素材의 疲勞限度擧動은 어떠하며, 또 미소원공을 갖는 材料와 미소슬릿을 갖는 材料와의 사이에는 高周波 熱處理 여부에 따라서 疲勞限度의 차이가 발생하는가 등을 우선 考察하고 이것을 토대로 疲勞擧動을 조사하려고 한다.

Fig.4 에는 各種 試驗片의 疲勞試驗結果이고, Table 3 에는 各種 材料의 疲勞限度와 노치계수를 提示하였다. 미소원공材로서 未熱處理材인 A'材의 疲勞限度는 $\sigma_{wk}=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 인데 비하여 高周波 熱處理한 B', C' 材의 疲勞限度는 各各 $\sigma_{wk}=37\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$, $\sigma_{wk}=48\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 이다. 미소슬릿材로서 未熱處理材인 A 材의 疲勞限度는 $\sigma_{wk}=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 高周波 熱處理材인 B, C 材의 疲勞限度는 各各 $\sigma_{wk}=35\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$, $\sigma_{wk}=46\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 이다. 미소원공材 및 미소슬릿材 공히 疲勞限度는 未熱處理材 보다 高周波 熱處理材가 훨씬 높다. 노치계수 β 의 값은 열처리여부에 관계없이 미소원공 및 미소슬릿材 사이에는 미소량의 변화만을 찾아 볼수 있다. 여기서 미소원공 및 미소슬릿材의 形態가 相異함에도 불구하고 동일한 條件의 高周波 熱處理를 한 材料의 疲勞

限度는 거의 차이가 없다는것은 무엇을 의미하는 것인지에 대한 의문은 아직도 남아 있으나 우선 缺陷모양의 차이로 인해 이들 사이에는 疲勞크랙 傳播擧動의 차이가 나타날것에 예상된다. 따라서 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播擧動을 檢討하고자 한다.

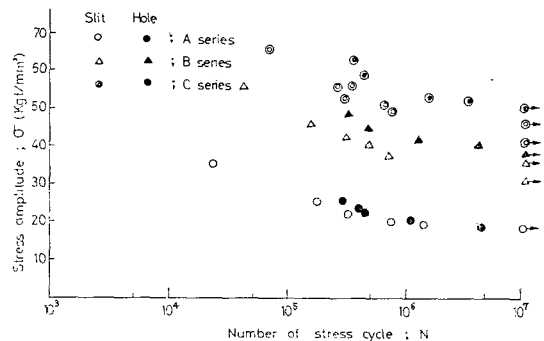


Fig. 4 S-N Curve of notched specimens

Table 3 Fatigue limit, Notch factor

Specimen No.	Fatigue limit of smooth specimen σ_{w0} (kg·f/mm ²)		Fatigue limit of notched specimen σ_{wk} (kg·f/mm ²)	Notch factor β
	A	B		
Slit	A	21	18	1.16
	B	40	35	1.14
	C	51	46	1.10
Hole	A'	21	18	1.16
	B'	40	37	1.08
	C'	51	48	1.06

3.2 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播擧動

미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播擧動을 검토하기 위해서 熱處理條件이 동일한 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播를 조사 하였다. 疲勞크랙 傳播는 疲勞限度 以上の 應力레벨 즉 疲勞限度 σ_{wk} 의 120% 應력을 負荷하여 反復數 $N=7.0 \times 10^4$, 2.0×10^5 , 2.5×10^6 에서 조사 하였는데 Fig. 5(a)(b)에는 그러한 疲

勞크랙 傳播舉動의 一例를 表示한 것이다. Fig. 5(a)는 미소원공材의 一例이고 Fig. 5(b)는 미소슬릿材의 例이다. 疲勞크랙의 發生傳播의 형태는 各 試驗片 公히 熱處理與否에 關係없이 거의 同一하다는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 이와같은 疲勞크랙의 傳播舉動을 정리한 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다. Fig. 6은 疲勞限度의 120%에 해당하는 應力레벨에서 조사한 結果로서 동일한 應力反復數를 기준으로 比較하여 보면 미소슬릿材의 疲勞크랙길이는 미소원공材의 그것보다 다소 길어 짐을 알 수 있고, 應力反復數가 變化하더라도 미소슬릿材의 크랙길이는 항상 미소원공材의 그것 보다 길다는 것을 알 수 있다. 이와같은 경향은 열처리여부에 關係없이 미소슬릿을 갖는 A, B, C 材 및 미소원공을 갖는 A', B', C' 材 公히 동일한 양상을 보인다. 이러한 현상을 定量的으로 表現하기 위해서 종축에 크랙길이 l , 횡축에 크랙전파속도 dl/dN 을 잡아 정리한 것이 Fig. 7이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 동일한 크랙길이를 기준으로 하여 比較해 보면 미소슬릿材가 미소원공材보다 크랙傳播速度가 항상 빠르며 크랙길이가 길어지더라도 그 比는 一定하다. 따라서 크랙길이와 크랙전파속도 사이에는 直線關係가 成立함을 알 수 있다. 이상은 各 試驗片이 갖는 疲勞限度의 120%에 해당하는 應力레벨에서의 관찰결과로서 應力の 大小가 이와같은 경향에 어떠한 영향을 주는가에 대해서 검토해 보코자 한다.

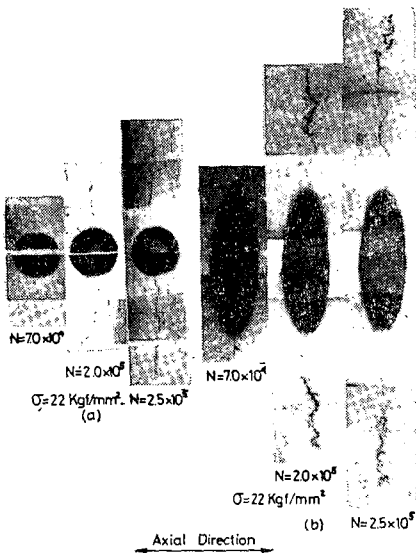


Fig. 5 Illustration of fatigue crack propagation at $\sigma_{wk} \times 120\%$ stress level

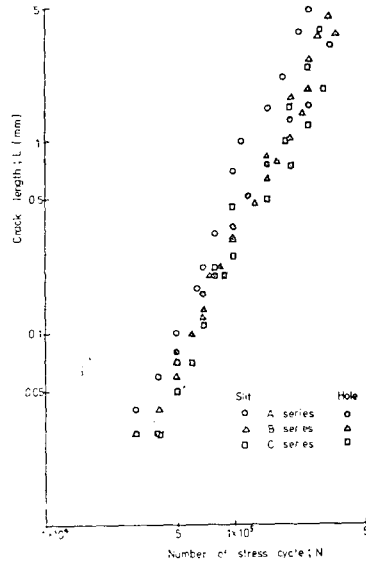


Fig. 6 Crack propagation curve at $\sigma_{wk} \times 120\%$ stress level

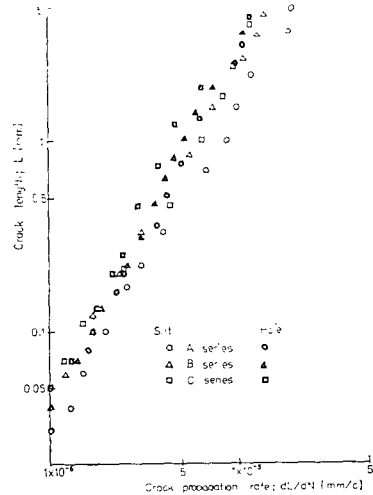


Fig. 7 Relationship between crack length and crack propagation rate at $\sigma_{wk} \times 120\%$ stress level

3.3 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播와 應力依存性

疲勞크랙傳播에 대한 負荷應力の 依存性 여부를 고 찰하기 위해서 종축에 크랙길이를 잡고 횡축에 破斷수명에 대한 一定크랙길이에 도달한 反復數 比 즉 상대반복수를 정리한 것이 Fig. 8(a)(b)(c)이다. 破斷수명 N_f 에 대한 一定크랙길이 N 의 比 $N/N_f = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, \dots$ 등으로 變化하더라도 疲勞크랙길이의 變化는 負荷되는 應力の 大小에 關係없이 一定한 곡선을 형성

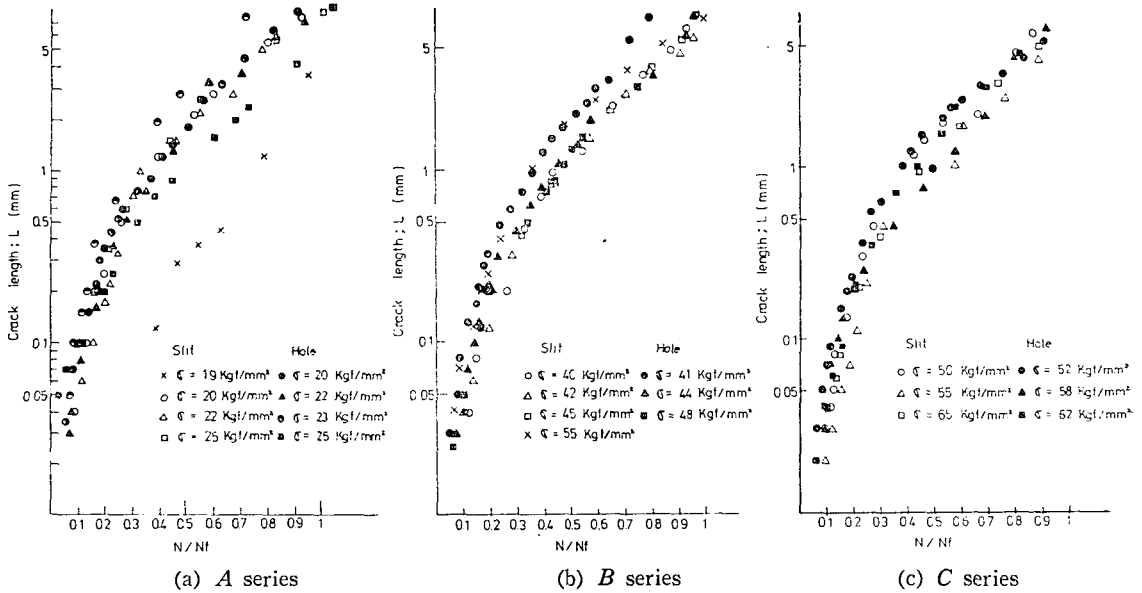


Fig. 8 Relationship between crack length and N/N_f for various stress level

하는 하나의 밴드속에 존재함을 알 수 있다. 이와같은 경향은 미소원공 및 미소슬릿材 공히 또는 高周波 熱處理如否에 관계 없이 동일한 경향을 나타낸다. 따라서 고주파열처리를 실시한 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播는 應力의 大小에 관계없이 一定한 特性을 갖고 있음을 알 수 있다.

3.4 미소원공 및 미소슬릿 주위의 疲勞크랙 傳播速度 舉動

前節에서도 언급한 바와같이 Fig. 6 과 Fig. 7에서

크랙길이와 크랙전파속도 및 상대반복수에 따른 變化 추이가 하나의 규칙성을 가지고 있고, 미소원공 및 미소슬릿材의 各各의 疲勞限度의 120% 應力레벨에서 크랙전파속도가 직선관계를 유지하고 있으므로 이러한 方法을 疲勞限度의 110%~140%의 多樣한 應力레벨에 대해서 總括하여 정리한 것이 Fig. 9(a)(b)(c)이다. 특히 Fig. 9(b)(c)의 高周波熱處理材인 경우의 미소슬릿 및 미소원공의 疲勞크랙 傳播速度 特性은 同一應力下에서는 피로크랙의 길이가 증가하더라도 하나의 직선형태로 나타나고, 또한 부과되는 應力의 크기가 다르

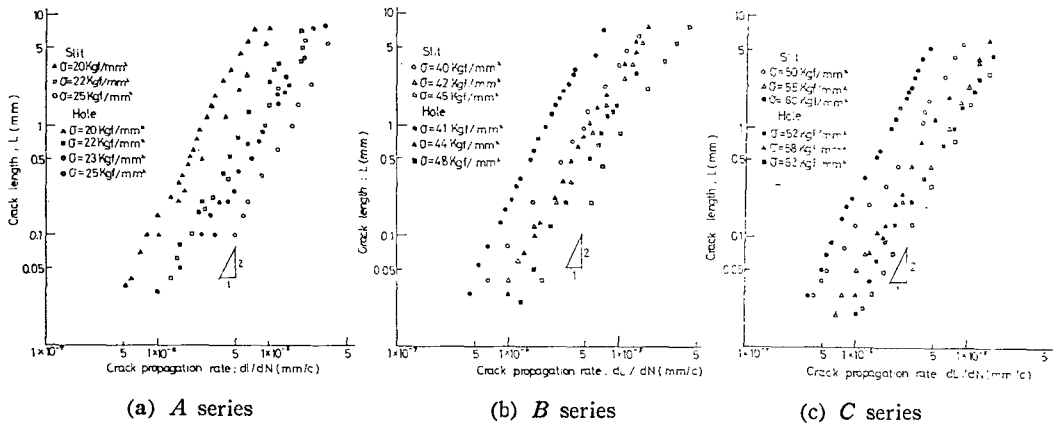


Fig. 9 Relationship between crack length and crack propagation rate for various stress level

라도 피로크랙전파속도 특성은 同一한 直線형태로 거의 평행하게 나타나지만 부하응력의 크기가 점점 증가할수록 그 직선은 왼쪽영역에서 오른쪽영역으로 점차 이동하는 특징을 갖는다. 結局 이 直線들의 경사를 확인해 본 결과 구배는 0.5 정도임을 알았다. 따라서 高周波 熱處理를 한 材料 및 未熱處理材料 또는 이들 材料에 주어진 노치형태가 미소원공 이든 미소슬릿이든 관계없이 피로크랙 전파속도 특성을 나타낼 수 있는 $dl/dN \propto l^n$ 으로 정리할 수 있음을 알았다.

3.5 미소원공 및 미소슬릿 주위의 疲勞크랙 傳播法則

本節에서는 高周波 熱處理를 한 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞크랙 傳播特性을 토대로 하여 疲勞크랙傳播法則의 적용여부를 검토 하였다. Fig. 10은 응력레벨에 따른 疲勞크랙 傳播速度 特性을 나타낸 것이다. 미소슬릿 및 미소원공材에 대해서 크랙길이 0.2mm 및 2mm의 一定한 값에 대한 공칭응력과 크랙전파속도의 관계는 직선을 이루고 있으며 여기서 各 材質에 따른 미소원공 및 미소슬릿材의 크랙傳播速度를 공칭응력과 크랙길이의 指數法則으로 表現하고자 한다. 즉 $dl/dN \propto \sigma^m \cdot l^n$ 에서 이미 크랙전파속도와 크랙길이의 관계에서 指數 $n=0.5$ 의 比例관계가 成立되었고, 공칭응력 σ 에 대한 指數 m 은 Fig. 10과 같은 方法으로 決定하여 Table 4에 그 값을 정리 하였다. 역시 熱處理 여부에 관계없이 미소슬릿材와 미소원공材에 따라서 直線의 경사가 다르고 또 동일한 노치에 대해서는 0.2mm, 2mm 크랙길이에 관계없이 一定한 기울기를 가지고 있다. 그래서 미소슬릿材의 指數가 미소원공材의 그것보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다.

한편 크랙傳播法則의 應力依存性을 檢討하고 材質에 따른 比例常數 C 를 決定하기 위해서 Fig. 11(a)(b)(c)를 정리하였다. 크랙전파속도 $dl/dN = C \cdot \sigma^m \cdot l^n$ 에서 $\sigma \cdot l^n$ 과 dl/dN 을 정리하였는데 우선 比例常數 C 는 원공 및 슬릿이나 열처리 여부에 따라서 다음과 같이 決定하였다. 즉 A, B, C材 공칭 $\sigma \cdot l^n$ 과 dl/dN 의 관계에서 기울기는 0.5이지만 比例常數 C 는 Fig. 11(a)(b)(c)와 실험데이터에서 구한 값은 다음과 같다. A材의 경우 미소슬릿材는 0.5×10^{-14} , 미소원공材는 0.5×10^{-13} , BC材의 경우 미소슬릿材는 0.5×10^{-12} , 미소원공材는 0.5×10^{-11} 이다. 따라서 C 값에 있어서는 미소슬릿材와 미소원공材 사이에 10^{-1} 만큼의 차이를 보이고 있으며 材質에 따라서는 A材와 BC材 사이에는

10^{-2} 의 차이를 가진다. 이러한 차이는 형상이 다른 미소노치에 있어서 거시적 파라메타인 노치계수를 比較해 보았을때 미소한 차이가 있었고 이로 인한 결과라고 생각한다.

그런데 각 응력레벨에서 크랙전파속도 특성을 조사해 보면 疲勞限度의 120%이하에 해당되는 응력과 그 이상의 응력사이에는 다음과 같은 특징을 발견할 수 있다. 즉 Fig. 11(a)에서 보면 A材의 경우 미소원공材는 $\sigma = 22 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2 (\sigma_{wk} \times 120\%)$, $\sigma = 23 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2 (\sigma_{wk} \times 130\%)$, $\sigma = 25 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2 (\sigma_{wk} \times 140\%)$ 의 응력레벨의 직선은 하나의 직선으로 모여지고 있으나 $\sigma = 20 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2 (\sigma_{wk} \times 110\%)$ 의 응력레벨의 직선은 그러하지 못하다. 미소슬릿材의 경우에도 $\sigma = 22 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2 (\sigma_{wk} \times 120\%)$ 와 $\sigma = 25 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2 (\sigma_{wk} \times 140\%)$ 은 하나의 직선으로 모여지고 있으나 $\sigma = 20 \text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ 의 응력에서는 그러하지 못하다. 이러한 경향은 B, C材에서도 거의 같은 현상을 보이고 있다. 따라서 本 실험에서의 疲勞크랙전파法則의 적용에 있어서 공칭응력과 크랙길이의 지수법칙으로 表現할 수 있는 限界공칭응력은 미소원공 및 미소슬릿材의 疲勞限度의 120% 이상의 응력레벨에서 적용 가능하다. 이러한 이유는 上記 크랙전파속도식의 적용이 微小表面균열을 대상으로 하였고, 平滑材나 다름없는 미소한 노치나 절함주위에 發生하는 表面크랙은 疲勞限度 以上の 高應力の 反復에 의한

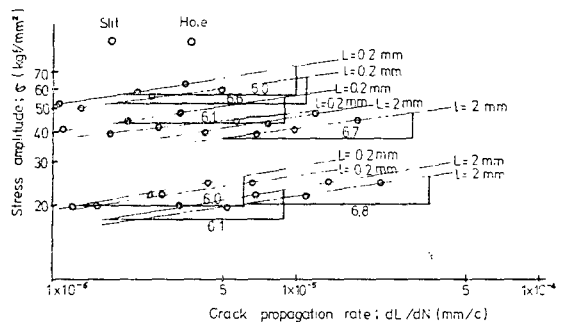


Fig. 10 Relationship between stress and crack propagation rate for crack length=0.2mm, 2mm

Table 4 The value of exponent m

Specimens	Notch	
	Slit	Hole
A series	6.8	6.1
B series	6.7	6.1
C series	6.6	6.0

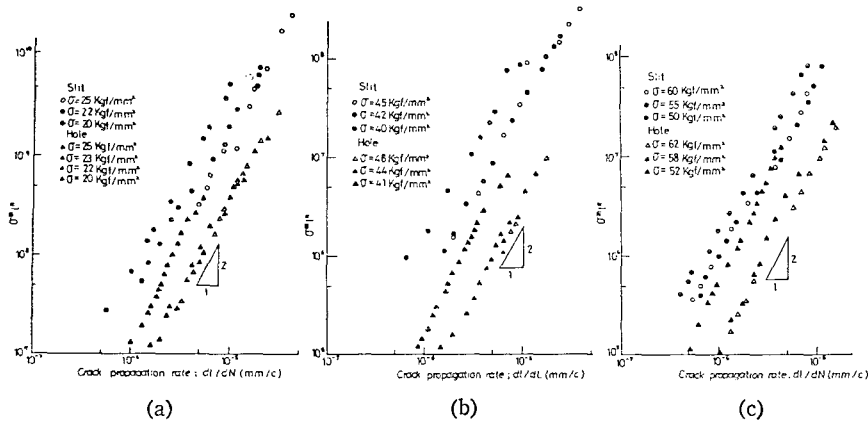


Fig. 11 Relationship between $\sigma\sqrt{a}$ and crack propagation rate

것이므로 대상이 되는 크랙의 치수를 작게하는데 따라서 크랙의 발생이나 성장에 필요한 응력은 상대적으로 높게되고 高應力下的 反復이 必然的이며 小規模降伏條件은 만족되기 어려운 상황 때문이라고 생각된다. 즉 高應力의 反復에 의해서 미소결합先端에 發生하는 크랙은 항상 소성영역인 슬립밴드나 미시크랙을 동반하며, ABC材 공히 넓게 분포하고 있기 때문이다.

4. 結 論

本 研究에서는 缺陷材의 缺陷先端에 發生 傳播하는 疲勞舉動을 檢討하기 위하여, 미소원공 및 미소슬릿을 갖는 試驗片을 對象으로 試驗片 表面에 관찰되는 疲勞 크랙 傳播舉動을 상세히 고찰하였다. 특히 缺陷材의 強度向上을 고려하여 試驗片은 850°C, 1,050°C의 高周波 熱處理를 行하였다. 얻어진 結論을 요약하면 다음과 같다.

(1) 미소원공 및 미소슬릿을 갖는 시험편의 疲勞限度는 소재, 850°C 및 1,050°C의 高周波 熱處理한 순서로 미소원공인 경우는 $\sigma=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$, $\sigma=37\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$, $\sigma=48\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 이고, 미소슬릿인 경우는 $\sigma=18\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$, $\sigma=35\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$, $\sigma=46\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 를 얻었다.

(2) 크랙길이가 同一한 경우 疲勞크랙의 傳播速度는 미소슬릿材인 경우가 미소원공材인 경우 보다 항상 빠르다. 그러나 疲勞크랙傳播 過程의 초기단계에서의 그것은 반드시 그렇지 않다.

(3) 破斷壽命 N_f 에 대한 一定크랙길이의 反復數 N 에 대한 비가 $N/N_f=0.1, 0.2, 0.3, \dots$ 등으로 변화하더라도 疲勞크랙길이의 변화는 高周波 熱處理 여부 및 負

荷되는 應力의 大小에 관계없이 항상 일정 한 곡선으로 나타낼 수 있다.

(4) 高周波 熱處理材인 경우의 疲勞크랙 거동은 미소원공 및 미소슬릿材에 관계없이 疲勞크랙 傳播속도와 公칭應力과의 사이에는 $dl/dN \propto \sigma\sqrt{a}$ 의 관계를 만족시킨다.

參 考 文 獻

- (1) 横堀式夫外 3人, 低炭素マルテンサイト高張力鋼의 疲勞き裂의 發生と傳ば, 日本金屬學會誌, 第35卷, 第1號, pp.70~82, 1971
- (2) 星出每彦外 1人, 表面缺陷からの 疲勞き裂傳ばの 彈塑性破壞力學的研究, 日本機械學會論文集, 第48卷, 第433號, pp.1102~1110, 1982
- (3) 村上, 遠藤, 疲勞強度におよぼす微小缺陷の影響 評價法, 日本機械學會論文集, 第49卷, 第438號, pp.127~136, 1983
- (4) 西谷弘信外 1人, 小穴付き試驗片の回轉曲げ試驗 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.325~334, 1976
- (5) 西谷弘信外 1人, Fe-3%Si合金における 疲勞き裂 傳ば則と塑性域の關係, 日本機械學會論文集, 第50卷, 第450號, pp.277~282, 1984
- (6) 北川英夫外 1人, 微小な 疲勞き裂の成長とその下 限界條件に關する破壞力學的研究, 日本機械學會論 文集, 第45卷, 第399號, pp.1289~1303, 1979
- (7) 幡中憲治外 2人, 低炭素鋼の回轉曲げ疲勞による 微小表面き裂の成長特性について, 日本機械學會論 文集, 第50卷, 第452號, pp.737~743, 1984

- (8) 末吉秀一外 2 人, 亞共析黑鉛鋼の疲勞き裂傳ば特性におよぼす組織學的因子の影響, 日本金屬學會誌, 第48卷, 第10號, pp. 971~977, 1984
- (9) 西谷弘信外 1 人, 小さい疲勞き裂の傳ば則と その疲勞壽命評價への應用, 日本機械學會論文集, 第50卷, 第404號, pp. 431~440, 1983
- (10) 西谷弘信外 1 人, 時効硬化 Al 合金おとび焼なま Al合金の回轉曲げ試験に於ける表面き裂の傳ば特性, 日本機械學會論文集, 第50卷, 第455號, pp. 1334~1339, 1984
- (11) 村上外 2 人, 疲勞強度におよ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
- (12) S. Kocanda, Fatigue Failure of Metals, Chap. 4, pp. 211, Sijthoff & Noordhoff International publishers, 1978