大韓機械學會論文集 第15卷 第6號, pp. 1839~1851, 1991.

〈論 文〉

過大, 過小 應力下에서의 疲勞크랙 發生擧動

(疲勞限度 應力을 中心으로)

宋森弘*·元時太**

(1991년 4월 1일 접수)

Behavior of Initiation and Propagation of Fatigue Crack under Periodic Overstressing

(In the case of Fatigue Limit Stresses)

Sam Hong Song and Si Tae Won

Key Words: Two-Level Stressing(2段階應力), Fatigue Limit(疲勞限度), Damage of Crack Tip(크랙先端部 被害), Crack Opening(크랙 열림) Crack Closure(크랙 닫힘)

Abstract

Fatigue crack behavior is studied through the two-level rotary bending test with the deep non-through radial holed notch specimens of low carbon steels(SM22C). The main factors investigated are the effects of the damage zone size around crack tip and phenomena of closing or opening of the crack tip. Obtained results are summarized as follows. Fatigue crack behavior in second level stressing slightly lower than fatigue limit is closely related to the size of damage zone produced by the first level stress higher than fatigue limit and to the phenomena of crack closing and opening for the second level stress. The non-propagating crack limit condition depends upon the crack length(l_1) propagated under the first level stress and the magnitude of second level stress(σ_2) lower than the fatigue limit. The non-propagating crack limit condition is expressed by following eq. $\sigma_2^{6.1} \times l_1 = 7.35 \times 10^6 [(kg_f/mm^2)^{6.1}(mm)]$

1. 序 論

航空機, 鐵道車輪, 船舶의 크랭크축 등 輸送用機械등의 部材는 사용환경과 운전 조건에 따라 荷重이 變動하는 경우가 大部分이고 따라서 이들 部材는 實際應力下에서의 疲勞擧動 및 疲勞壽命의 정확한 예측이 매우 중요하다.

이와관련하여 不規則한 應力狀態에 대한 疲勞壽命을 검토하는데 가장 간단하고 보편적으로 사용되고있는 被害理論은 Miner[1]가 제안한 線形累積損傷法則이고 이것은 被害程度를 단순히 사이클비(n/N)로 가정하여 總損傷率(D_f)이 1이 되면 材料는 損傷이 누적되어 破壞가 일어난다고 하였다.

또한 Elber[2]등은 變動荷重을 받는 경우 疲勞크랙 닫힘현상이 疲勞크랙 傳播의 加速 및 遲延效果에 영향을 미치는 것으로 보고하였고 Garrett[3], 青家[4], 佐佐木茂美[5]등은 疲勞過程中 發生하는 크랙先端部의 局部的인 變形硬化 및 軟化現象에 의한 차이가 크랙의 닫힘현상 및 疲勞크랙 傳播擧動을 지배한다고 하였다.

한편 Euw[6], Weiss[7] 및 Lankford[8]등은 變動荷

*正會員, 高麗大學校 機械工學科
**正會員, 서울産業大學 金型設計學科

重에 의하여 형성된 塑性領域의 크기와 塑性領域內의 殘留應力등이 크랙傳播의 遲延效果를 갖는다고 하였다.

한편 青木[9] 및 中村[10] 등은 變動應力을 받는 部材의 크랙傳播曲線을 檢討한 結果 크랙傳播의 平行側과 重合側을 제안하였는데 특히 크랙傳播期間中 應力이 變動된 경우에서 應力下降인 경우에는 平行側이, 應力上昇인 경우에는 重合側이 성립한다고 하였다.

결국 變動應力이 가해지는 경우, 疲勞크랙傳播擧動은 變動應力의 時期 및 順序, 塑性領域의 分布와 크기, 크랙의 열림 및 닫힘현상에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

이와같은 관점에서 前報[11,12]에서는 不規則荷重을 받는 部材에 대한 硏究의 基礎로서 2段應力 모델을 설정하고 基準應力에서 슬립밴드가 發生한 初期段階와 크랙이 傳播한 段階로 구분한 후 過大 및 過小應力을 가하고 表面크랙 傳播擧動을 중심으로 검토한 결과 크랙先端部에서 發生한 被害程度에 따라 被害狀況이 현저히 차이가 나는 크랙傳播段階에서 變動應力이 作用하면 表面크랙 傳播曲線에 큰 영향이 나타남을 알았다.

또한 試驗片의 表面에 微小缺陷 또는 初期노치가 존재하면 作用應力의 크기에 따라서 表面크랙 및 內部크랙의 傳播擧動의 차이에 의한 크랙面 形狀[13]이 변화가 생기는 점을 고려하여 內部크랙 傳播擧動을 중심으로 검토한 결과 특히 基準應力에 의해 크랙이 傳播한 段階에서 過大應力을 받으면 壓縮應力狀態에서의 크랙닫힘 程度가 過小應力에 해당하는 基準應力의 그것보다 좋지 못하기 때문에 이것에 의한 실제 作用應力의 增加와 함께 內部크랙의 깊이차이에 의한 영향이 크랙을 빨리 傳播시킴을 알았다.

以上의 硏究는 모두 有限壽命 領域內에서 應力이 變動하는 경우의 結果이다. 그러나 실제 機械 및 構造物 部材의 應用設計時에는 安定性을 고려하여 疲勞限度를 중심으로 한 應力에서의 應力變動이 매우 중요하다고 생각된다.

따라서 本 硏究는 系統的인 硏究로서 前報[11,12]의 實驗結果를 토대로 2段階應力이 作用하는 경우에 우선 疲勞限度 以上의 1次應力을 가한후 疲勞限度 以下의 2次應力을 가한 경우에 나타나는 疲勞크랙 擧動, 즉 疲勞크랙 發生, 傳播擧動과 應力狀態에 따른 疲勞크랙의 열림과 닫힘 등의 擧動을 상세히 고찰하였다.

2. 實驗方法

本 實驗에 사용한 試驗片은 國產構造用 炭素鋼材이고 化學成分과 機械的性質은 Table 1 및 Table 2와 같다.

疲勞試驗片은 Fig. 1과 같이 슬립밴드 및 크랙의 길이를 측정하는데 용이함을 위해 이들이 試驗片의 한 部分에서 크랙이 발생하도록 圓孔의 지름 $d=1$ mm, 깊이 $h=5d$로 비관통시켰다.

한편 表面크랙은 圓孔의 先端에서 發生, 傳播하

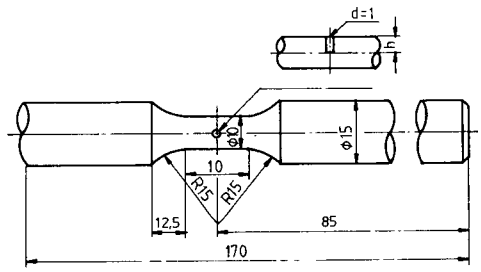


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen (Unit : mm)

Table 1 Chemical composition (W_t %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
SM22C	0.23	0.15	0.50	0.003	0.022	0.01	0.01	0.01	0.03

Table 2 Mechanical properties

Material	Tensile strength (kg_f/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)
SM22C	68	14	46	200

므로 이것의 관찰을 용이하게 하기 위해 연마지 # 1200까지 연마한 후 電解硏磨하였다.

本 實驗에 사용한 疲勞試驗機는 小野 (Ono)型 回轉굽힘 疲勞試驗機이고 試驗機의 能力은 最大굽힘모멘트 10Kg$_f$−m, 每分 回轉數는 3000 rpm이다.

應力의 계산은 공칭응력으로 하였고 應力모델은 前報[11,12]의 實驗方法과 같이 Fig.2의 2段應力 모델을 선정하였다. 여기서 먼저 가하는 疲勞限度以上의 應力은 1次應力(σ_1 : 편의상 基準應力으로 한다)으로 하고 基準應力보다 후에 가하는 疲勞限度以下의 應力을 2次應力(σ_2)이라 한다. 그리고 2次應力이 가해지는 時期를 前報[11]의 表面크랙 傳播擧動과의 관계를 고려하여 基準應力에 의해 圓孔先端에서 슬립밴드가 발생한 段階 및 크랙이 傳播한 段階인 l=0.75mm와 l=1.25mm의 3段階로 구분 하였다.

이때 傳播하는 表面크랙길이(l)는 Fig. 3과 같이 圓孔과 圓孔의 양단에서 傳播한 크랙의 반[$l=(l_1+l_2+d)/2$]으로 하였다.

한편 基準應力에 의해 크랙先端部에 발생하는 被害分布 測定은 被害를 입지않는 부분의 硬度値가 母材의 硬度値와 같다는 가정에서 佐佐木茂美[5], Bathias[14]등이 행한 방법으로 微小硬度計를 사용하였다. 특히 本 實驗의 경우에는 試驗片 조직이 結晶粒의 크기가 약 20μm 인 퍼얼라이트와 페라이트조직으로 구성되어 있기 때문에 이들 조직이 어느정도 동시에 압입될 수 있는 微小硬度壓子의

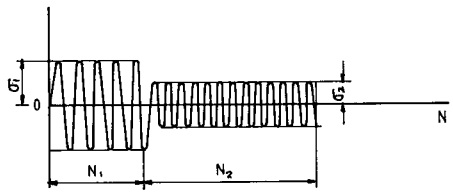


Fig. 2 The model of the two level stressing

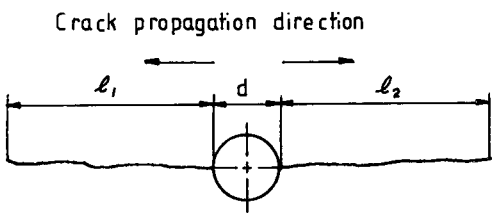


Fig. 3 Surface crack length ($\frac{l_1+l_2+d}{2}$) (Unit : mm)

크기를 고려하여 하중 100gr, 시간 30 초의 조건(H_v=200, 압입자국의 대각선길이 d=30.4μm)으로 하였고 압자간격은 0.1~1mm의 간격으로 測定하므로서 微小硬度壓子에 의한 영향을 가능한 한 피하였다.

이때 微小硬度値의 측정방향은 크랙선단부에서 크랙에 직각인 방향(x방향)과 크랙진행방향(y방향)으로 구분하여 母材의 微小硬度値(Hv=200)와 같은 값이 나오는 위치까지 測定하였다.

또한 각각의 應力狀態에 따른 크랙의 열림 및 닫힘현상을 검토하기 위하여 試驗片 表面의 引張및 壓縮狀態에 대한 크랙모양을 크랙부위에 아세틸셀룰로우스를 메틸아세테이트 용제로 부착하여 건조시킨 1단계 레프리카를 만들어 채취하고 금속현미경에서 200배의 배율로 관찰하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 S-N 曲線과 基準應力에서의 疲勞크랙 傳播擧動

本 節에서는 基準應力에 의한 表面크랙 傳播特性을 조사하기 위하여 먼저 Fig.4와 같은 S-N 곡선을 구하고 이때 얻어진 疲勞限度는 σ_w=16.5Kg$_f$/mm^{2}이다. 이때 試驗片은 疲勞限度以上의 反復應力을 받으면 圓孔先端의 表面에서 슬립이 발생하고 이 슬립이 누적되어 슬립밴드에 의한 軟化現狀이 생긴후 初期크랙을 발생시키고 이후 발생된 크랙이 傳播하여 最終破斷에 이른다.

한편 Table 3은 疲勞限度(σ_w=16.5Kg$_f$/mm^2)의 약 1.2배인 σ=20Kg$_f$/mm^{2}을 基準應力으로 정하고 이 基準應力下에서 破斷壽命(N_f)에 대한 슬립밴드 發生壽命(n_1), 圓孔先端에서 微視表面크랙의 發生壽命(n_2) [本 實驗에서는 100μm 정도의 크기를 의미한다[15].], 表面크랙(l)이 약 0.75mm 및 1.25 mm 程度까지 傳播하는 壽命(n_3, n_4) 등을 구한 것이다.

한편 Fig. 5는 基準應力에서 圓孔의 先端에서 발생한 슬립밴드를 나타낸 것으로서 슬립밴드는 페라이트 조직내에서만 발생하여 산재하고 있음을 볼수있고 Fig.6은 基準應力에서 크랙이 傳播하는 樣相을 나타낸 것으로서 傳播하는 主 크랙의 先端 및 주위에는 塑性域과 微視크랙을 동반하면서 크랙이 傳播함을 볼수있으며 이때 圓孔先端 및 크랙先端部 表面에는 微視的인 變化에 의한 被害가 발생함을

Table 3 The ratio of n_i/N_f

Basic stress (Kg_f/mm^2)	$\sigma=20Kg_f/mm^2$	
Cycle to fracture (N_f)	$N_f=1\times10^6$	
(1) Slip band occurrence stage	$n_1=7.5\times10^4$	$n_1/N_f=7.5\%$
(2) Crack initiation stage ($100\mu m$)	$n_2=1\times10^5$	$n_2/N_f=10\%$
(3) Crack propagation stage ($l=0.75mm$)	$n_3=2\times10^5$	$n_3/N_f=20\%$
(4) Crack propagation stage ($l=1.25mm$)	$n_4=3.5\times10^5$	$n_4/N_f=35\%$

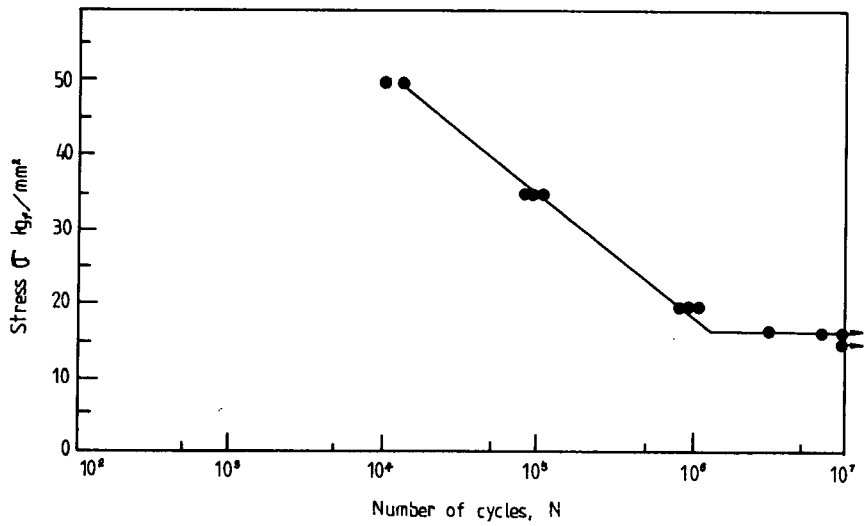


Fig. 4 *S-N* curve

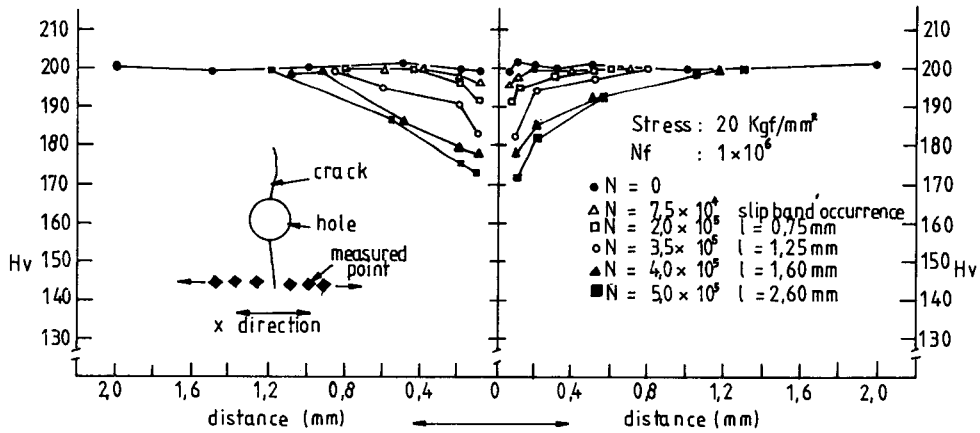
Fig. 5 Example of the slip band occurrence ($\sigma=20kg_f/mm^2$, $N=7.5\times10^4$), 400x

알 수 있다.

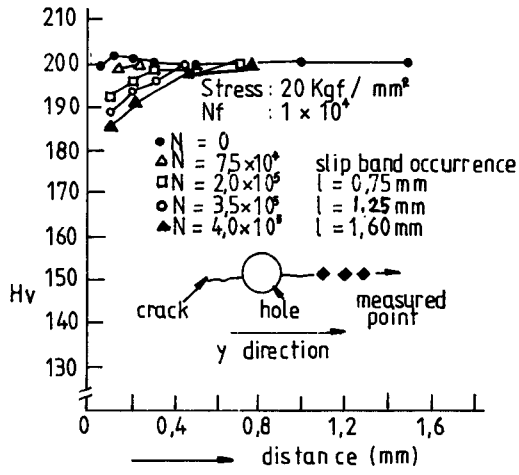
한편 슬립밴드가 존재하는 영역은 局部的으로 降伏狀態에 있다고 볼 수 있으므로 이 領域은 塑性領域의 크기와 관련이 있다고 생각되며 Baithias[14]는 應力擴大係數 범위(ΔK)의 함수로서 표시되는 塑性領域의 크기는 크랙先端주위의 硬度値의 變化와 관련이 있다고 하였다. 따라서 크랙先端 주위의 被害層領域의 크기는 硬度値를 측정하여 검토하였다.

Fig. 7은 基準應力에서 應力反復數(N)의 증가에 따른 크랙先端 주위의 硬度値를 測定한 결과로서 應力反復數의 增加에 따라 크랙先端에서의 微小硬度値는 反復應力을 받지않은($N=0$) 母材의 硬度値($H_v=200$)에 비교하여 현저하게 저하하는 경향을 나타낸다. 그러나 크랙先端 주위의 微小硬度値는

Fig. 6 Characteristic of fatigue crack propagation(σ=20kg$_f$/mm^2, N=3.5×10^5, l=1.25mm), 200x



(a)



(b)

Fig. 7 Micro-vickers hardness distribution vs number of cycle ratio (Load : 100gr. Time : 30 sec)

크랙先端에서 위치가 멀어질수록 점차 증가하다가 母材의 硬度値(H_v=200)와 같은 값이 나타남을 볼 수 있다. 여기서 Fig. 7(a)는 x방향(크랙에 직각방향)에 대한 硬度値이고 Fig.7(b)는 y방향(크랙 진행방향)의 硬度値를 측정한 것이다.

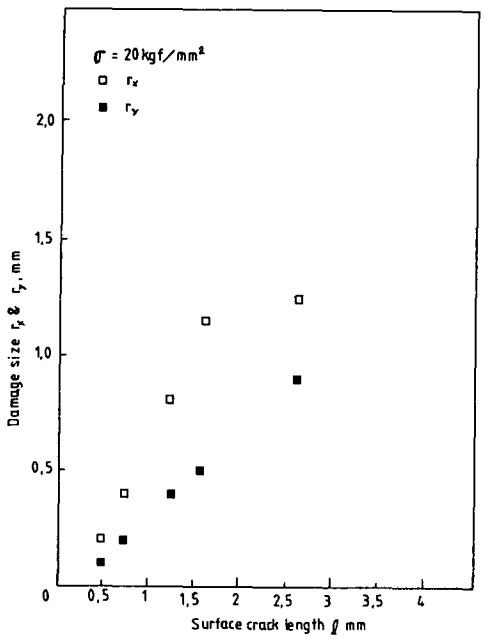


Fig. 8 Relation between surface crack length and damage size at crack tip

따라서 基準應力에 의한 被害層領域의 크기는 크랙先端 주위에서 측정한 硬度値가 反復應力을 받지 않은(N=0) 母材의 硬度値와 一致하는 위치까지의 領域으로 볼 수 있으며 이때 被害層 領域의 크기는 應力反復數가 增加할수록 점점 증가함을 알 수있다. 이와같은 양상은 木村[16]등이 應力反復數의 增加와 더불어 크랙先端 주위의 有限領域의 크기내에서 塑性變形은 增加된다고 한 結果와 잘 일치하고 있다. 또한 被害層 領域의 형상은 다른 測定方法에 의하여 얻어진 結果[17]와 같이 크랙중심에 대하여 거의 대칭임을 알 수 있다.

한편 Fig. 8은 被害層領域의 크기와 表面크랙길이(l)와의 관계를 나타낸 것으로서 r_x(크랙의 직각방향에 대한 被害層領域의 크기), r_y(크랙진행방향에 대한 被害層領域의 크기)는 일정크랙길이 구간에서는 크랙성장과 더불어 공히 증가 하고 있으나 동일한 表面크랙길이에서는 r_x가 r_y보다 큼을 알 수 있다.

3.2 疲勞限度以上의 基準應力을 받은 후 疲勞限度以下의 2次應力을 받는 경우의 疲勞크랙擧動

Fig. 9는 疲勞限度以上의 基準應力(σ_1=20kg$_f$/

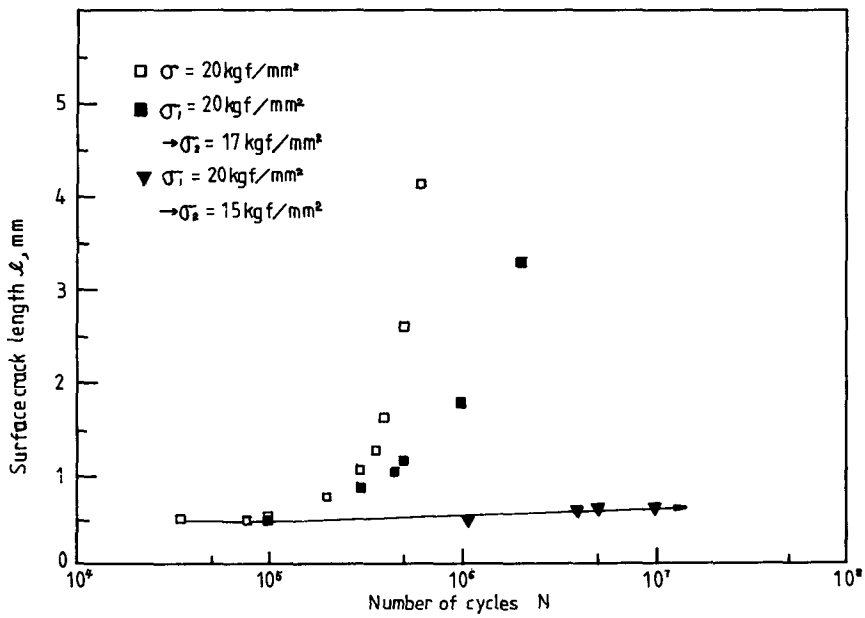


Fig. 9 $l-N$ curves for second level stressing at slip band occurring stage

mm²)에서 슬립밴드가 발생한 후 2次應力인 $\sigma_2=17$ kg$_f$/mm² 및 $\sigma_2=15$kg$_f$/mm²을 가한 경우의 表面 크랙길이(l)와 反復數(N)의 관계를 나타낸 것이다.

이때 2次應力이 疲勞限度의 1.03배인 $\sigma_2=17$kg$_f$/mm²에서는 크랙이 傳播하고 있음을 알 수 있고 2次應力이 疲勞限度의 약 0.9배인 $\sigma_2=15$kg$_f$/mm²으로 변화시킨 경우에는 1×10^7회 反復數에서도 破壞가 일어나지 않았다. 그러나 Fig. 10에서 보는 바와같이 2次應力下에서 약 0.6mm의 非傳播크랙[18,19]이 發生했음을 알 수 있다. 이 때 非傳播크랙은 疲勞限度以上의 基準應力에서 이미 發生되어 있는 슬립밴드 領域內에서 發生되어 있음을 알 수 있다.

한편 Fig. 11은 基準應力 $\sigma_1=20$kg$_f$/mm²에서 크랙이 0.75mm 傳播한 다음 2次應力을 가한 결과 나타나는 表面크랙길이(l)와 反復數(N)의 관계를 나타낸다.

이때 2次應力이 疲勞限度의 약 0.9배인 $\sigma_2=15$ kg$_f$/mm²으로 변화된 경우에는 크랙이 傳播하고 있음을 알 수 있다. 그러나 2次應力이 $\sigma_2=14$kg$_f$/mm² 및 $\sigma_2=13$kg$_f$/mm²으로 변화된 경우에는 $1\times$

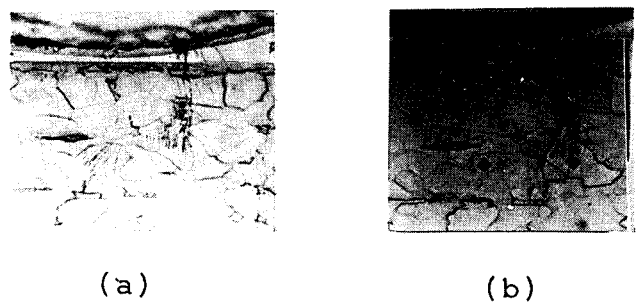


Fig. 10 (a) Slip band occurrence under first level stressing ($\sigma_1=20$kg$_f$/mm², $N=7.5\times10^4$)
(b) Non-propagating crack in case of second level stressing ($\sigma_2=15$kg$_f$/mm², $N=1\times10^7$) after slip band occurrence under first level stressing ($\sigma_1=20$kg$_f$/mm², $N=7.5\times10^4$) 200x

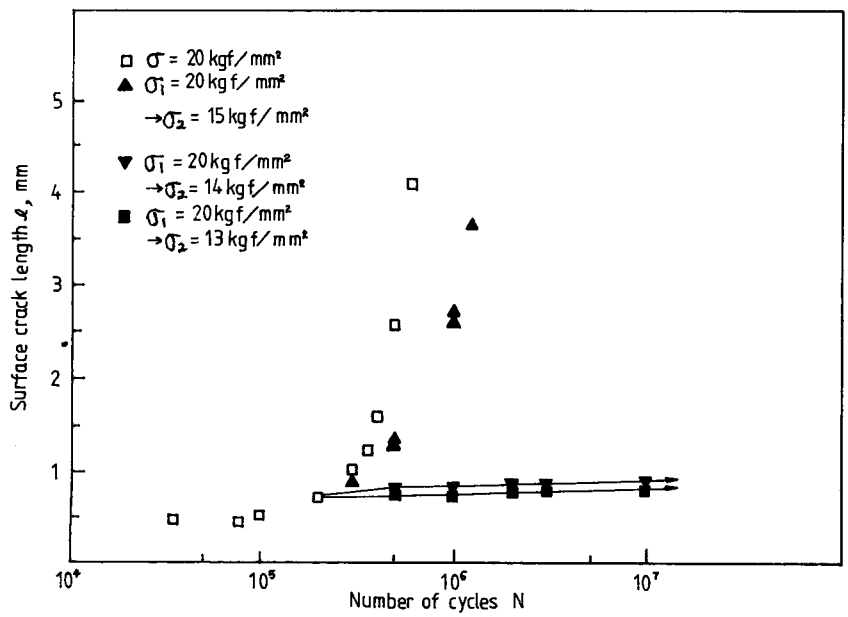


Fig. 11 $l-N$ curves for second level stressing at crack propagation stage ($l=0.75$mm)

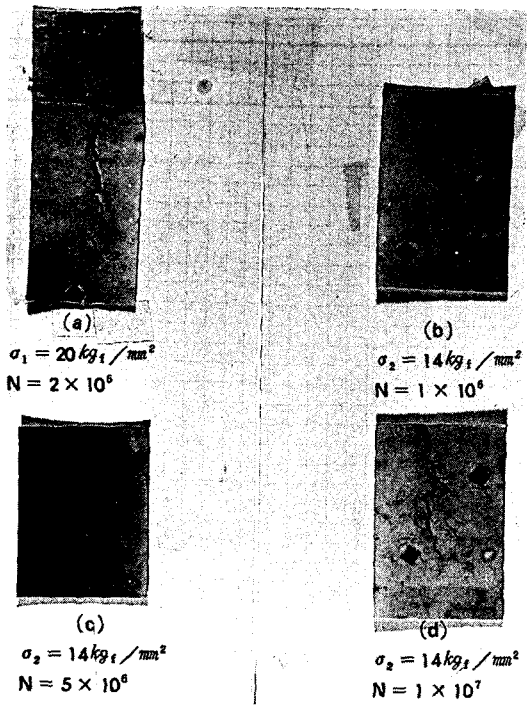


Fig. 12 (a) The crack propagation under first level stressing ($\sigma_1=20kg_f/mm^2$, $N=2\times10^5$, $l=0.75mm$)
(b), (c), (d) Non-propagating crack in second level stressing case ($\sigma_2=14kg_f/mm^2$, $N=1\times10^6$, $N=5\times10^6$, $N=1\times10^7$) after the crack propagates ($l=0.75mm$) under first level stressing ($\sigma_1=20kg_f/mm^2$, $N=2\times10^5$), 200x

10^7회 反復數에서도 破壞가 일어나지 않고 각각 0.9mm 및 0.8mm의 非傳播크랙이 나타남을 알았다. 따라서 疲勞限度以上의 基準應力에서 크랙이 0.75mm 傳播한후 破壞가 일어나지 않는 2次應力은 $\sigma_2=14kg_f/mm^2$으로 볼수있고 이 應力은 疲勞限度의 약 0.85배이다.

이때 Fig.12는 2次應力이 $\sigma_2=14kg_f/mm^2$으로 변화된 경우에 反復數의 증가에 따른 크랙先端部의 모양을 나타낸 것이고 1×10^7회 反復數에서도 破壞되지 않고 크랙이 정지된 상태를 나타낸 것이다.

한편 Fig. 13은 基準應力($\sigma_1=20kg_f/mm^2$)에서 크랙이 1.25mm 傳播한 후 2次應力 즉 $\sigma_2=15kg_f/mm^2$, $\sigma_2=14kg_f/mm^2$ 및 $\sigma_2=13kg_f/mm^2$으로 各各 變化시킨 경우 表面 크랙길이(l)와 反復數(N)의 관계를 나타낸 것이다.

이때 2次應力이 $\sigma_2=15kg_f/mm^2$ 및 $\sigma_2=14kg_f/mm^2$으로 變化시킨 경우에는 크랙이 계속 傳播하여 破斷에 이르지만 疲勞限度의 약 0.79배인 $\sigma_2=13kg_f/mm^2$으로 變化시킨 경우에는 1×10^7회 反復數에서도 破壞되지 않고 약 1.35mm의 非傳播크랙이 나타남을 알았다. 이때 Fig.14는 2次應力 $\sigma_2=13kg_f/mm^2$에서 1×10^7회 反復數에서도 破壞되지 않고 정지된 크랙을 나타낸 것이다.

以上의 結果에서 疲勞限度以上의 基準應力을 받은 후 疲勞限度以下의 2次應力으로 變動되면 크랙

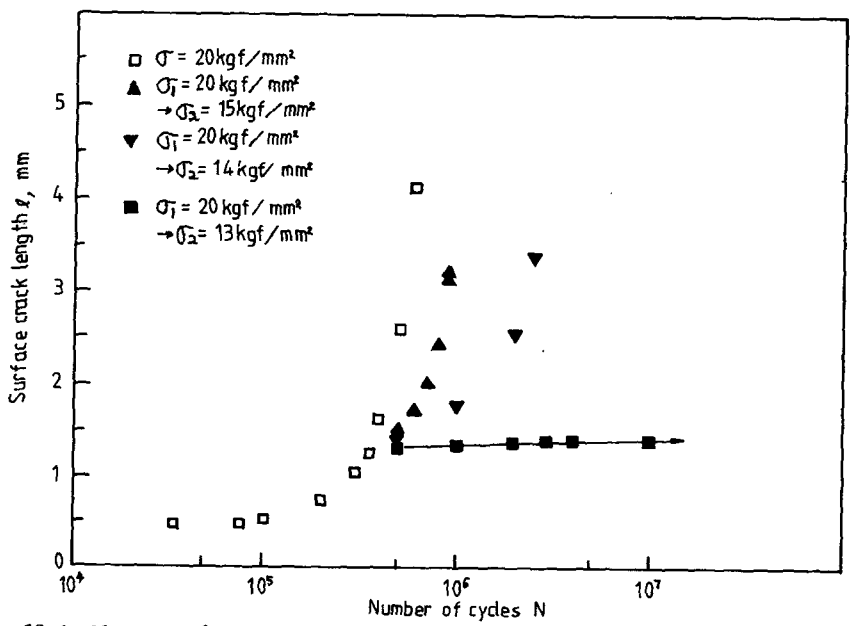


Fig. 13 $l-N$ curves for second level stressing at crack propagation stage ($l=1.25mm$)

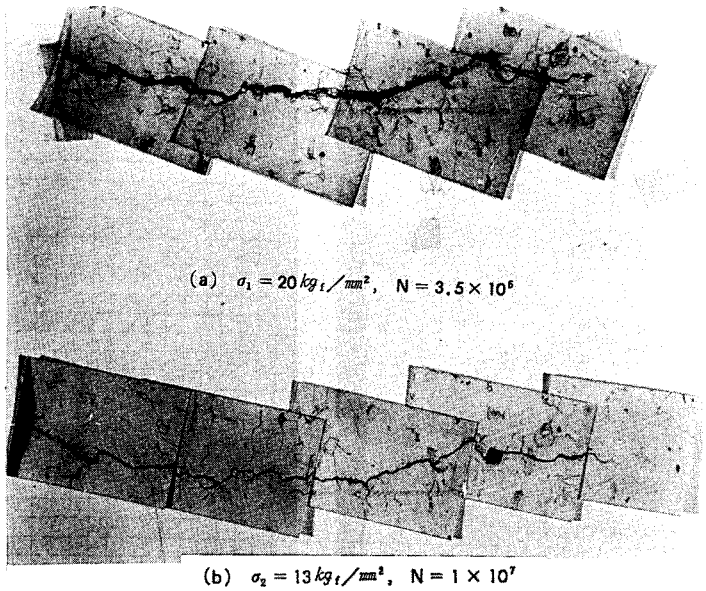


Fig. 14 (a) The crack propagation under first level stressing (σ_1=20kg$_f$/mm^2, N=3.5×10^5, l= 1.25mm) (b) Non-propagating crack in second level stressing case (σ_2=13kg$_f$/mm^2, N=1×10^7) after the crack propagates (l=1.25mm) under first level stressing (σ_1=20kg$_f$/mm^2, N=3.5×10^5), 200x

이 傳播하여 破壞하는 경우와 크랙이 정지하여 破壞하지 않는 경우로 크게 구분할 수 있다.

따라서 크랙이 정지하는 限界條件을 檢討하기 위하여 基準應力($\sigma_1$kg$_f$/mm^2)에서 傳播한 크랙길이(l_1)와 그 후에 가해지는 2次應力($\sigma_2$kg$_f$/mm^2)과의 관계를 檢討하였다.

Fig.15는 이들의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 직선아래 영역의 應力은 破壞를 일으키지 않고 직선 윗부분의 영역의 應力은 破壞하는 應力을 나타낸다. 따라서 그림에서 표시한 직선은 破斷되지 않는 限界條件을 나타낸다.

한편 三澤[20]등은 이 限界條件式을 다음과 같이 표시하였다.

$$\sigma_2^m \cdot l_1 = \text{Const.} \qquad (1)$$

여기서 m은 指數이고 本 實驗의 경우 指數(m)의 값은 6.1을 나타낸다. 따라서 이들의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_2^{6.1} \cdot l_1 = 7.35\times10^6[(\text{kg}_f/\text{mm}^2)^{6.1}(\text{mm})] \qquad (2)$$

한편 Fig. 16은 基準應力에서 疲勞限度以下의 2次應力으로 변화시킨 후 크랙이 傳播하는 경우, 크랙 傳播速度(dl/dN)와 表面 크랙길이 (l)와의 관계를 검토한 것이다.

이때 크랙 傳播速度(dl/dN)는 2次應力으로 변화된 初期에 높은 상태를 나타내고 있으나 점차 表

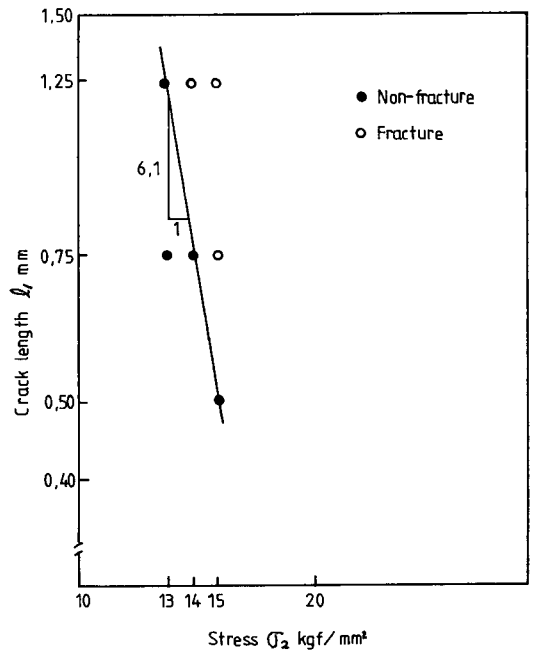


Fig. 15 Relation between crack length propagates under first level stressing (l_1) and magnitude of second level stress (σ_2)

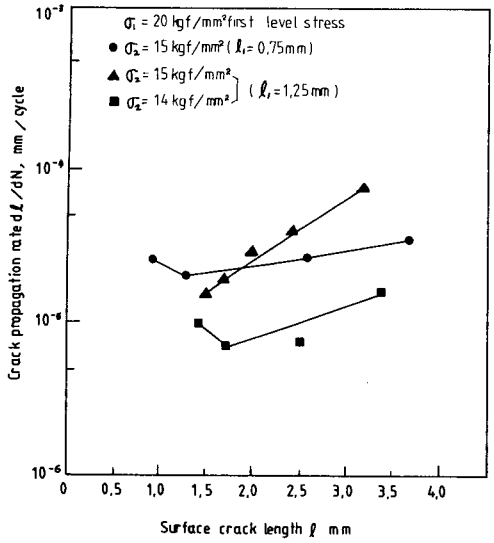


Fig. 16 Relation between crack propagation rate (dl/dN) and surface crack length (l) in case of the propagating crack

面 크랙길이 (l)의 증가와 더불어 크랙 傳播速度가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 이 감소경향 이후에 계속 反復數가 증가하면 크랙 傳播速度는 다시 증가하여 破壞에 도달한다.

이상과 같이 疲勞限度以下의 2次應力을 받는 경우에서 크랙이 傳播할때의 경향은 前報[11]의 結果에서 얻어진 疲勞限度以上의 有限壽命 領域內에서 過小應力으로 變化시킨 경우 크랙이 傳播하는 樣相과 비슷한 경향을 나타낸다.

3.3 크랙傳播에 영향을 주는 크랙의 열림과 닫힘 擧動

3.2節에서 檢討한 바와같이 疲勞限度以上의 基礎應力을 받는 후 疲勞限度以下의 2次應力이 作用하면 크랙이 傳播하는 경우와 정지하는 경우가 나타난다. 따라서 이와 같은 현상에 대하여 基準應力에서 發生한 被害層 領域의 크기와 함께 크랙의 열림과 닫힘 현상에 의한 因子와 관련지어 검토하여 보기로 한다.

먼저 基準應力에서 發生한 被害層 領域의 크기에 의한 영향을 고려하면 Fig. 9, Fig. 11 및 Fig. 13에서 살펴 본 바와같이 基準應力에서 2次應力으로 변화된 경우에서 크랙이 정지되어 破壞에 이르지 않더라도 미소량의 크랙($\Delta l = l - l_1$)이 傳播 했음을 알았다. 여기서 l은 疲勞限度以下의 2次應力에서 정지된 表面 크랙길이이고 l_1은 2次應力으로 변화되기 이전에 基準應力에서 傳播한 表面 크랙길이이다.

이와 관련하여 Fig. 17은 疲勞限度以上의 基準應力($\sigma_1 = 20 kg_f/mm^2$)에서 나타난 被害層 領域(r_x, r_y)과 이후 疲勞限度 以下의 2次應力에서 1×10^7회 反復數에서도 破壞되지 않고 크랙이 정지된 경우에서 나타나고 있는 비전파크랙의 증가량(Δl)과의

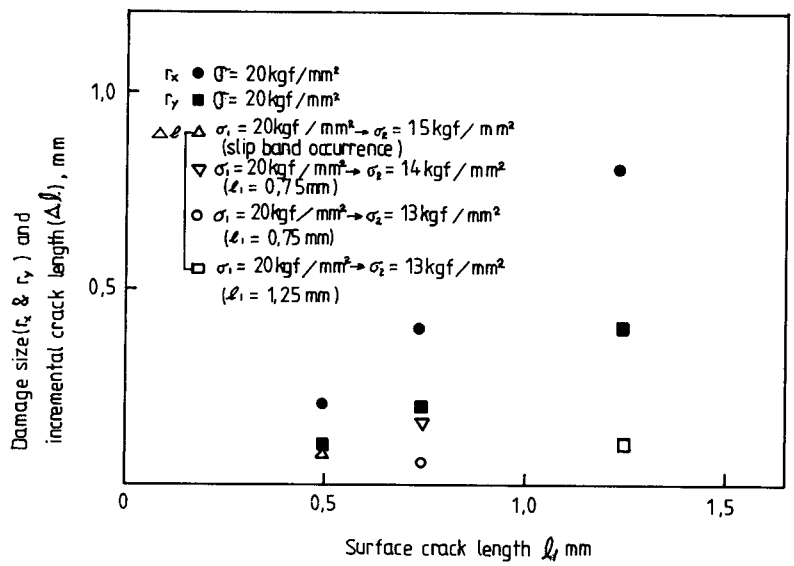


Fig. 17 Relation between damage size (γ_x, γ_y) and incremental crack length (Δl) in case of the non-propagating crack

관계를 도시한 것이다.

이 때 크랙의 증가량(Δl)은 被害層 領域(r_x, r_y) 내에서 傳播했음을 볼 수 있고 三澤[20]등이 疲勞限度以下의 應力에 의한 크랙傳播機構는 크랙發生에 의한 應力集中과 단면적 감소에 의한 실응력의 증가 및 크랙 先端에 생성된 被害領域內의 材料强度의 低下와 관련 된다고 제안한 점을 고려하면 本實驗의 경우와 같이 疲勞限度以下의 2次應力을 받는 경우 疲勞限度以上의 基準應力에서 이미 존재하고 있는 크랙先端주위의 被害層 領域(r_x, r_y)은 크랙 傳播擧動과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

이와 함께 疲勞限度以上의 基準應力에서는 크랙 先端部가 軟化現狀이 나타나지만 疲勞限度以下의 應力을 받는 경우에 크랙선단부에는 점차적인 硬化現狀이 나타나게 되는 코오싱 효과[18,21]에 의한 영향도 크랙傳播를 저지시키는 원인이라고 지적되고 있다.

한편 Elber[2]등은 크랙 닫힘현상의 설명에서 크랙이 傳播하기 위해서는 크랙 先端部에 나타난 닫힘을 열어주는 최소한 크기 이상의 限界應力이 작용하여야 한다고 하였다. 따라서 본 實驗과 같이 回轉 굽힘 疲勞에서는 引張 및 壓縮狀態가 反復되고 이들 應力狀態에 따라 引張의 경우에는 크랙열림현상이 壓縮의 경우에는 크랙닫힘현상이 나타나게 된다.

따라서 Fig. 18은 疲勞限度以下의 2次應力에서 크랙이 傳播하는 경우의 일례로서 크랙이 壓縮 및 引張狀態에 놓이는 경우 크랙 닫힘 및 열림현상을 관찰한 것이다. 이때 작용하는 2次應力의 크기는 壓縮狀態에서는 크랙先端部의 닫힘현상이 나타나지만 크랙이 引張狀態에 놓이면 열림현상을 볼수있고 이때 引張狀態에서 2次應力은 크랙 先端部를 열어

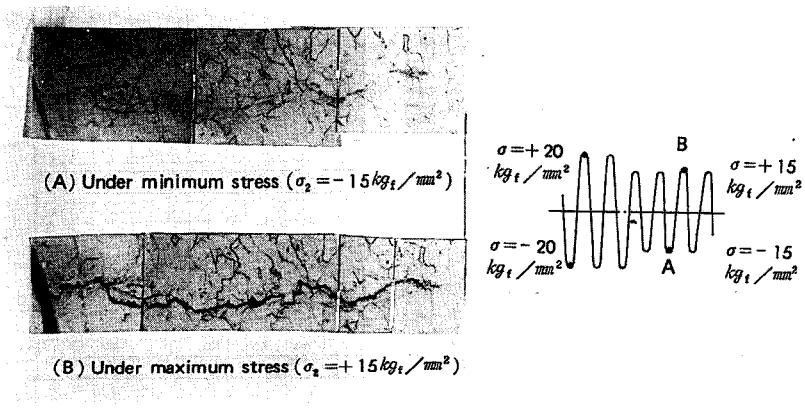


Fig. 18 Crack opening or closure of propagating crack for second level stressing after the crack propagates under the first level stressing, 200x

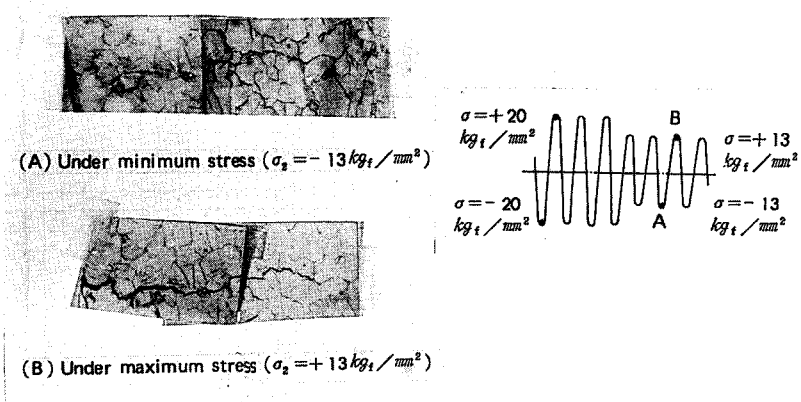


Fig. 19 Crack opening or closure of the nonpropagating crack for second level stressing after the crack propagates under the first level stressing, 200x

주는 限界應力이 되어서 이들 크랙 닫힘 및 열림현상이 계속 반복되면서 크랙이 傳播하는 것으로 생각된다.

그러나 Fig. 19는 疲勞限度以下의 2次應力에서 크랙이 정지하는 경우를 나타낸 일례이다. 이때 크랙이 壓縮狀態에 놓인 경우 크랙 닫힘현상을 볼수 있고 引張狀態에 놓인 경우에는 圓孔先端에 가까운 부분은 열림현상이 나타나고 있지만 크랙 先端部에서는 크랙이 계속 닫힌 상태로 남게되어 壓縮 및 引張狀態의 어느경우에도 크랙先端部는 계속 닫힌 상태로 존재한다.

이상과 같은 관점에서 크랙이 계속 傳播하는 Fig.18의 경우와는 달리 2次應力의 크기가 크랙을 열어주는 限界應力보다 낮은 경우에는 이 2次應力이 크랙이 引張狀態에 놓이는 경우에도 크랙先端部의 크랙을 열어주지 못하기 때문에 크랙이 傳播하지 못하고 정지하는 것으로 생각된다.

한편 Nisitani[22], 高尾[23]등이 一定應力을 받는 경우에도 作用應力이 낮으면 정류크랙이 존재하고 이때 정류크랙 先端部는 引張狀態에서도 크랙 닫힘현상을 볼 수 있다고 한 점을 고려하면 本 實驗의 경우와 같이 基準應力에서 2次應力으로 변하는 경우에 나타나는 비전파크랙은 정류크랙의 경우와 같이 생각할 수 있다.

4. 結 論

國産 構造用 炭素鋼材(SM22C)를 使用하여 2段應力 모델을 設定하고 疲勞限度以上의 基準應力에 의해 圓孔先端 表面에 슬립밴드가 發生한 段階와 크랙이 傳播한 段階로 區分하여 疲勞限度以下의 2次應力을 가한 結果 나타나는 크랙傳播擧動을 크랙先端部에 發生한 微視的인 變化와 함께 크랙 닫힘 및 열림現狀에 의해 檢討하였다.

이때 얻어진 結果를 요약하면 다음과 같다.

(1) 基準應力에서 슬립밴드 및 表面크랙이 傳播한 段階에서 2次應力으로 變化 되면 크랙이 계속 傳播하여 破壞하는 경우와 크랙이 정지하여 破壞하지 않는 경우로 나타난다.

이때 크랙이 정지하는 限界條件式은 基準應力에서 이미 傳播한 表面 크랙길이(l_1)와 그후에 가해지는 2次應力(σ_2)의 크기에 依存하고 다음과 같다.

$$\sigma_2^{6.1} l_1 = 7.35 \times 10^6 [(kg_f/mm^2)^{6.1} (mm)]$$

(2) 크랙이 정지한 경우 2次應力에 의해 傳播한 크랙의 미소 증가량(Δl)은 이미 基準應力에서 發生한 被害層 領域(r_x, r_y)內에서 나타난다.

(3) 2次應力에서 크랙이 傳播하는 경우는 2次應力에 의해 크랙先端部가 壓縮狀態에서는 크랙 닫힘현상이 引張狀態에서는 크랙열림현상이 나타나고 이때 2次應力은 크랙을 열어주는 限界應力이 되어 이들 크랙 닫힘 및 열림現狀이 계속 反復되면서 크랙이 傳播한다.

(4) 2次應力에서 크랙이 정지하는 경우는 2次應力에 의해 壓縮 및 引張狀態에서 공히 크랙先端部는 크랙 닫힘現狀이 나타난다.

後 記

本 研究는 韓國科學財團 基礎研究費 지원과제(No. 881-0910-019-2)의 研究費 일환으로 研究되었으며 관계제위께 심심한 사의를 표합니다.

參考文獻

(1) Miner, M.A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," Trans.ASTM, J.Applied Mech. 12A 159.

(2) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," ASTMSTP 486, pp.230～242.

(3) Garret, G.G., 1976, "On The Influence of Cyclic Herdening and Crack Opening Displacement on Crack Advance During Fatigue," Metallurgical Transaction, Vol.7A, pp.884～887.

(4) 清家正一郎, 1976, "巨視的に引張り形およびせん断形疲勞き裂の進展における先端部の 材質的變化", 日本機械學會論文集, 第42券, 第354號, pp. 317～323.

(5) 佐佐木茂美, 1968, "軟鋼の疲れ壽命と ビツカースかたさの關係", 日本機械學會論文集, 第34卷, 第266號, pp.1627～1634.

(6) Von Euw E.F.J. et al, 1972, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation," ASTM STP 513, pp.230～259.

(7) Ben-Zion Weiss, 1971, "Plastic Zone Formation and Fatigue Crack Extension During High Cyclic Bending of Steels," Engineering Fracture Mechannics, Vol.3, pp.475～491.

(8) Lankford, J., 1976, "Fatigue Crack Tip Plasticity Associated with Overloads and Subsequent Cycling," Journal of Engineering Materials and Technology, Transaction of the ASME, pp. 17~23.

(9) 青木逸郎 外, 1968, "實動應力と疲れ强さ", 日本機械學會論文集, 第34卷, 第267號, pp. 1854~1862.

(10) 中村宏, 1970, "最小の$\sum(n_i/N_i)$の値を 與えの應力パタ-ン に關する一實驗", 日本機械學會論文集, 第36卷, 第287號, pp.1059~1066.

(11) 宋森弘, 元時太, 1985, "過大, 過小應力下에서의 疲勞크랙 發生傳播擧動(Ⅰ)", 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第3號, pp.301~308.

(12) 宋森弘, 元時太, 1986, "過大, 過小應力下에서의 疲勞크랙 發生傳播擧動(Ⅱ)", 大學機械學會論文集, 第10卷, 第2號, pp. 188~197.

(13) 宋森弘, 元時太, 1988, "深孔 非貫通 노치材의 疲勞크랙 傳播擧動에 관한 硏究", 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第6號, pp.188~197.

(14) Baithias et al, 1972, "Fatigue Crack Propagation in Martensitic and Austenitic Steels," Metallurgical Transaction, Vol.3, pp. 1189~1202.

(15) 村上裕則 外, 1979, "破壞力學入門", pp. 127, オ-ム社.

(16) 木村雄二, 1976, "疲勞き裂の傳ば速度に現れる統計的 變動と その微視組織的 要因について", 日本機械學會論文集, 第42卷, 第353號, pp. 1~7.

(17) Davidson, D.L., 1976, "Plastic Strain Distribution at the Tips of Propagating Fatigue Cracks," Transactions of the ASME, pp. 24~29.

(18) 西谷弘信, 1973, "疲れ限度の存在と 微視的停留き裂の關係", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第321號, pp. 1385~1393.

(19) Nisitani, H., 1974, "Behavior of a Tip of Non-Propagating Fatigue Crack during One Stress Cycle," Engineering Fracture Mechanics, Vol.6, pp. 253~260.

(20) 三澤啓志, 1973, "疲れ限度以下の應力によるき裂の進展", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第324號, pp. 2305~2311.

(21) 河本實, 1974, "金屬の疲れと設計", pp. 85~88, pp. 248~250, コロナ社.

(22) Nisitani, H., 1977, "Observation of Crack Closure Phenomena at the Tip of a Fatigue Crack by Electron Microscopy," Fracture, Vol.2, pp.1099~1108.

(23) 高尾健一, 1982, "微視的疲勞き裂傳ばに及ぼす 小數回高應力 負荷の影響", 日本機械學會論文集(A編), 第48卷, 第435號, pp. 1391~1397.