大韓機械學會論文集 第 12 卷 第 3 號, pp.505~512, 1988.

〈論 文〉

炭素鋼 微小疲勞크랙 전파의 下限界條件

金 敏 健*

(1988年 1月 22日 接受)

Threshold Condition for the Propagation of Short Fatigue Crack

Min-Gun Kim

Key Words : Carbon Steel(炭素鋼), Fatigue(疲勞), Endurance Limit(疲勞限度), Short Crack(微小크랙), Critical Non-Propagating Crack Length(限界停留크랙길이), Threshold Condition(下限界條件)

Abstract

Since the propagation of a short fatigue crack is directly related to the large crack which causes the fracture of bulk specimen, the detailed study on the propagation of the short crack is essential to prevent the fatigue fracture. However, a number of recent studies have demonstrated that the short crack can grow at a low applied stress level which are predicted from the threshold condition of large crack. In present study, the threshold condition for the propagation of short fatigue crack is examined with respect to the microstructure and cyclic loading history. Specimens employed in this study were decarburized eutectoid steels which have various decarburized ferrite volume fraction. Rotating bending fatigue test was carried out on these specimens with the special emphasis on the "critical non-propagating crack length." It is found that the reduction of the endurance limit of their particular microstructures can be due to the increase of the length of critical non-propagating crack, and the quantitative relationship between the threshold stress $\Delta\sigma_{th}$ and the critical non-propagating crack length Lc can be written as $\Delta\sigma_{th} \cdot Lc = C$ where m, C is constant. Further experiments were carried out on the effect of pearlitic structure and cyclic loading history on the length of critical non-propagating crack. It is shown that the length of critical non-propagating crack is closely related to both pearlite interlamellar spacing and cyclic loading history.

1. 序 論

近年, 비교적 긴 貫通크랙에 대한 力學的 觀點으로부터의 定量的 評價法이 확립되었기 때문에, 실제의 機械·構造物에서 疲勞크랙이 문제가 되는것은 오히려 材料缺陷 또는 應力集中部로부터 발생하여 전파하는 表面微小크랙인 경우가 많다. 따라서, 機械·構造物의 疲勞壽命을 정확히 예측하여 安全한 사용을 보장하기 위해서는, 微小크랙擧動의 定量的인 파악이 極히 중요하다고 할수 있다. 그런데 微小크랙의 경우, 그 전파特性이 대단히 까다로와, 特히 微視組織的 因子에 敏感하기 때문에 連續體力學을 기반으로 하는 線形破壞力學(Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM)에 의한 定量的 취급은 成功하고 있지 않는게 現實이다.

*正會員, 江原大學校 工科大學 機械工學科

이러한 까닭으로, 微小疲勞크랙전파의 下限界條件에 關한 연구는 별로 많지 않은데, 그중에서 代表的인 연구는 Kitagawa의 연구라고 할 수 있다[1]. Kitagawa는 表面 予크랙을 지닌 세종류의 丸棒 시험편에 對하여, 크랙전파 下限界應力을 조사하였다. 그 결과, 크랙길이가 긴 巨視크랙의 전파下限界條件은 ΔK_{th}=const.의 관계를 나타내는데 對하여, 크랙길이가 감소하여 0.5mm 정도가 되면서부터, 同 條件은 ΔK_{th}=const.의 直線關係로부터 離脫하기 시작하여 平滑材의 疲勞限度에 漸近한다는 결론을 얻고 있다. 즉, 微小크랙은 巨視크랙의 ΔK_{th} 以下의 應力 레벨에서도 전파할 수 있으며, 그 下限界條件은 LEFM의 槪念으로부터 기대되는 ΔK_{th}=const.가 아님을 보여주고 있다.

實際, 탄소강 平滑材에 있어서, 疲勞限度의 應力이 10^7回 以上 반복 負荷된 시험편 표면에는 0.1~0.5mm 정도의 微小크랙들이 다수 발생해 있다. 그런데, 이들은 모두 疲勞限度에서 더이상 전파하지 않는 이른바 停留크랙(non-propagating crack : NPC)들로서, 平滑材의 疲勞限度는 바로 이 停留크랙들의 전파 下限界應力에 対応한다[2~6]. 그러므로, 이들 微小停留크랙의 전파下限界條件에 관한 연구는 疲勞限度의 本質을 밝히는데 있어서도 대단히 중요한 要素라고 할수 있겠다. 그런데, 다수의 停留크랙들이 발생함으로 인해, 그들중에서 어느 크랙을 該當 負荷下에서의 『限界길이(critical length)』로 定하여 疲勞限度와의 관계를 論할 것인가가 問題가 된다. 말하자면, 일반적으로 생각하여 停留크랙들 中에서 最長의 길이를 택한다고 하여도, 그 길이가 해당 負荷下에서 발생 할 수 있는 限界停留크랙길이와 꼭 一致한다고는 볼 수 없다. 바로 이러한 點이, 平滑材의 疲勞限度와 관련된 停留크랙전파의 下限界條件의 定量的 評價를 곤란하게 하는 主된 要因이라고 생각한다.

이처럼, 停留크랙의 전파 下限界條件의 評價에 있어서, 우선 生成된 많은 停留크랙들 中에서 이른바 『限界狀態』에 達해 있는 크랙을 찾아내는 것이 緊要하다. 즉, 해당負荷下에서 生成 될 수 있는 最大의 停留크랙길이(앞으로 이것을 『限界停留크랙길이 : Lc』라 稱한다.)를 우선 찾아내고, 이 限界停留 크랙길이의 전파 下限界應力으로서의 疲勞限度를 究明하는 것이 妥當하다고 생각한다.

本 研究에서는, 上述한 『限界停留크랙길이』를 찾아내는 것을 主要手段으로 하여, 그 전파 下限界應力으로서의 疲勞限度와의 관계를 定量的으로 검토하고, 微小크랙전파擧動이 微視組織 또는 疲勞負荷履歷등에 敏感함을 감안하여, 이들 因子가 微小크랙 전파의 下限界條件에 미치는 影響에 関하여 검토하기로 하였다.

Table 1 Chemical composition of specimen material

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.84	0.22	0.45	0.014	0.027	0.03	0.02	0.10

2. 試驗片 및 實驗方法

Table 1에 그 성분을 표시한 共析鋼을 母材(ϕ20 mm)로 하고, 거기에 1200°C 2시간의 燒鈍처리를 하면 母材 표면으로 부터 대략 5mm의 깊이에 걸쳐서 脫炭 페라이트 層이 형성된다. 그러므로 열처리에 들어가기 前에, 장래 試驗部가 될 부분의 직경이 12.5mm, 13mm, 13.5mm가 되도록 미리 母材를 旋削해 두고 上記의 열처리를 실시한다. 그다음, 이들 재료를 사용하여 최종적으로 試驗部직경 ϕ9, R20의 丸棒시험편으로 가공하면, 표면 페라이트 體積分率이 相異한 여러종류의 시험편을 제작할 수가 있다. 이렇게 해서 얻어진 3종류의 시험편의 페라이트 體積分率은 각각 13%, 6%, 2%인데, 큰 순서부터 A材, B材, C材로 하였다. D材는 脫炭페라이트 層을 전부 旋削 제거한 시험편이다.

Fig. 1은, A材의 깊이 방향의 脫炭상태를 나타낸

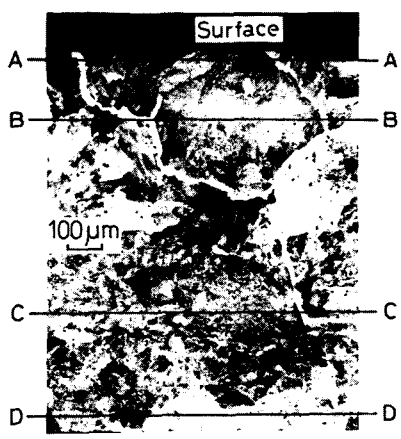

Fig. 1 The decarburied situation of series A in the direction of depth. B-B, C-C, D-D indicate surface microstructure of series B,C,D, respectively

Table 2 Heat treatment conditions, microstructural parameters and mechanical properties of five materials

Series	A	B	C	D	E
Heat treatment condition	1200°C 2 hours annealing				1000°C ↓ transformed to pearlite at 550°C
V_{fF}† at surface(%)	13	6	2	0	
Total decarburized depth (mm)	1.20	0.95	0.24	0	
Mean length of ferrite (μm)	200	190	150	***	********
Pearlite interlamellar spacing (μm)	0.54				0.24
H_v of ferrite (20g, 50points)	143	150		***	*********
H_v of pearlite (50g, 100points)	260	257			281
0.2% proof stress (MPa)	256	277	306	319	536
Ultimate tensile strength (MPa)	683	714	735	773	967

† Volume fraction of ferrite

사진이다. 同 사진상에는 B,C,D材의 표면 조직에 대응하는 상대적 位置관계도 표시되어 있다. 또한 이들 4종류의 시험편은, 어느것도 同一의 퍼얼라이트라멜라(lamella) 간격을 갖고 있다. 이런 脫炭 시험편을 사용하여 크랙전파 下限界條件을 평가할 때 얻어지는 長點은, 同一 母材를 갖고 여러 레벨의 疲勞限度를 얻으면서 크랙先端組織의 크랙擴大 抵抗이 均一한 여러 종류의 微視組織을 얻을수 있

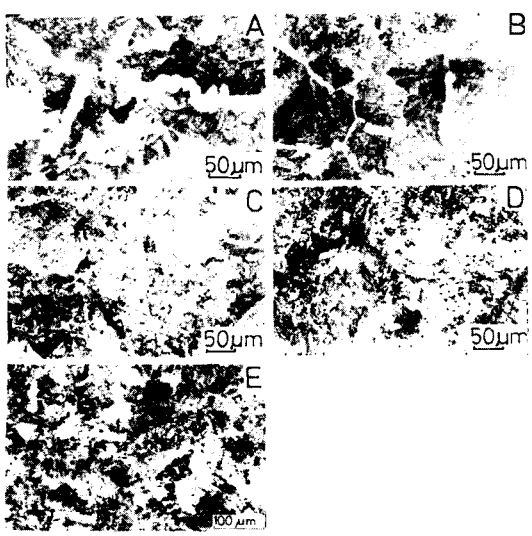

Fig. 2 Surface microstructure of specimens

으므로, 크랙길이와 전파 下限界應力間의 정확한 比較를 가능케 한다는 점이다.

한편 E材는, 上述의 A,B,C,D材와 동일한 母材를 사용하여, 새롭게 Table 2에 표시한 열처리조작을 실시함에 의해 퍼얼라이트 라멜라 간격을 변화시킨 시험편이다. 그 결과 E材의 퍼얼라이트 라멜라 간격은, A,B,C,D材의 0.54μm에 比하여 약 절반정도의 0.24μm이 되었다. 이들 시험편의 표면조직사진을 Fig. 2에 나타내었다. 조직사진을 보면, A材 → B材 → C材 일수록 표면 페라이트의 量이 감소하고 있음을 알 수 있다.

시험편은 試驗部를 에머리 紙로 硏磨하고, 640°C 1시간의 眞空燒鈍에 이어 전해硏磨를 실시한 후 피로시험에 사용하였다. 각 材의 組織 파라미터 및 機械的 性質등을 Table 2에 병기한다.

試驗機는 회전굽힘피로시험기(3000 rpm)를 사용하였고, 시험편 표면에서의 크랙길이는, 모두 시험편축 직각방향에의 투영길이를 金屬현미경下에서 측정하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 脫炭處理를 한 共析鋼의 疲勞限度와 限界停留 크랙길이

表面層 조직에 있어서 脫炭 페라이트 體積分率

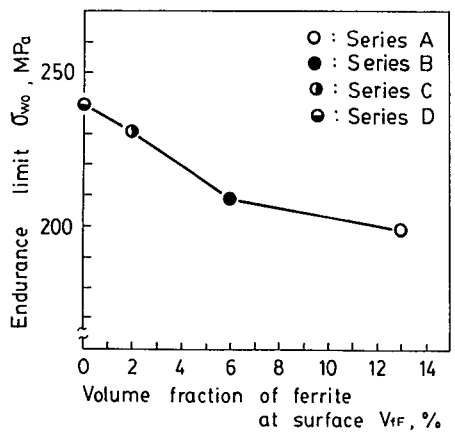

Fig. 3 Relationship between the endurance limit and the volume fraction of ferrite at surface

V_{fF}=13, 6, 2, 0%의 4종류로 변화시킨 A,B,C,D材를 사용하여, 회전굽힘 疲勞시험으로부터 얻어진 疲勞限度를 V_{fF}에 대하여 나타낸 것이 Fig. 3이다. 그림으로부터, V_{fF}의 증가에 따라 疲勞限度가 감소하고, V_{fF}=13%의 A材에서는 σ_{wo}=199MPa임에 對하여, 脫炭層을 갖지않는 D材에서 σ_{wo}=240 MPa이다.

이것은, 서론에서 말한 것처럼, 疲勞限度의 應力이 발생한 停留크랙의 전파限界應力에 대응하므로, A,B,C,D材에 있어서 V_{fF}의 변화와 더불어 限界停留크랙의 길이가 달라지는데서 緣由한다고 볼수있다. 따라서 우선 A,B,C,D材에 대하여 크랙전파의 樣相을 조사하기로 하였다. 그 결과, 이들 各 材의 표면 조직중에 관찰되는 크랙은, 예외없이 脫炭페라이트 部에 발생하여 페라이트 帶를 따라 전파하고, 최후에는 퍼얼라이트相 境界附近에서 停留하였다. 그 한 例를 Fig. 4에 나타내었다.

다음으로, 各 材의 疲勞限度의 大小를 직접 지배하는 것으로 예상되는 限界停留크랙길이 Lc를 求하기로 하였다. Lc를 구하는 방법은 다음과 같은 手法을 사용하였다. 우선, 各 材의 시험편을 다수 준비하고, 이들 시험편에다 各 材의 σ_{wo}보다 10% 정도 높은 應力을 5~9×10^5回 負荷하여 여러 길이를 갖는 予크랙을 도입한다. 그 다음, 이들 予크랙 시험편에 대하여 각각의 σ_{wo}에서 再次 疲勞시험을 실시하여 破斷의 有無를 조사하는 방법으로, 각각의 Lc의 평가를 시도하였다. 이러한 방법으로 실시한 A,B,C,D材의 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 破斷하지 않은 시험편의 予크랙은, 어느 정도의 新전파 과정을 거친후 停留하게 되는데, Fig. 5의 縱軸은 最終 停留한 크랙길이를 나타내고 있다. Fig. 5로부터 평가되는 Lc는, A材의 경우 Lc, A=400 μm, B材의 경우 Lc, B=340μm, C材의 경우 Lc, C=250μm, D材의 경우 Lc, D=190μm으로, 이들 Lc는 각각의 해당 應力下에서 견딜수 있는 크랙의 限界길이라고 생각된다. 또한 V_{fF}의 증가에 따라 Lc도 커져서, 平滑材의 疲勞限度의 大小가 Lc에 의하여 직접 지배되고 있음을 알 수 있다.

여기서, 참고로 B材의 疲勞限度응력 σ_{wo}=210 MPa에서 10^7回 以上 疲勞負荷後 조사된 停留크랙 길이의 분포도를 소개하면 Fig. 6이다. 그림에서 L_{max}은 250μm정도인데, Fig. 5에서 求한 B材의 Lc는 340μm으로 Fig. 6의 L_{max}의 1.5倍가 넘는 수치임을 注目하기 바란다. 이것은, 서론에서 강조했듯이, 발생하는 停留크랙들이 周圍의 微視組織的 因子들의 영향을 받아서 충분한 力學的 限界狀態까지 도달하기 前에 停留하고 있음을 의미하고 있다.

한편, 퍼얼라이트 조직은 微小크랙의 전파를 저지하는 役割을 수행하는 것으로 알려져 있다[7~8]. 이점은 앞서 지적했듯이, 脫炭 페라이트部에서 발생한 크랙이 퍼얼라이트相 境界附近에서 많이 停留해 있는 觀察결과와도 符合되는데, 이처럼 퍼얼라이트 조직은 微小크랙 전파의 下限界條件에도 영향을 줄 수 있는 것으로 생각되어진다. 다음節에서는, 이점에 대하여 좀더 詳細히 검토해 보기로 한다.

3.2 퍼얼라이트 라멜라(Lamella) 間隔과 限界停留크랙길이

Fig. 4의 停留크랙 주변의 퍼얼라이트 組織狀態를 模式的으로 나타내면 Fig. 7과 같이 된다. 그림에서 注目할 사실은, 퍼얼라이트 中에서 局所的으로 존재하는 라멜라間隔이 작은 코로니(colony)가 큰 코로니에 比하여 크랙停留에 對하여 보다 효과적인 役割을 보인다는 점이다. 이처럼, 라멜라 間隔의 大小에 起因하는 퍼얼라이트의 强度가 크랙停留에 중요한 영향을 준다면, 同一 材料에 對하여 열처러 조건을 변경함으로써 라멜라 間隔을 변화시킨 시험편에서는, 疲勞限度와 이에 따른 Lc의 變化가 期待된다. 따라서, Table 2에 나타낸 열처리 操作에 의하여 퍼얼라이트 라멜라 間隔을 감소시킨 E材를 제작하여 시험하기로 하였다.

새로이 얻어진 E材의 라멜라 間隔은, Table 2에

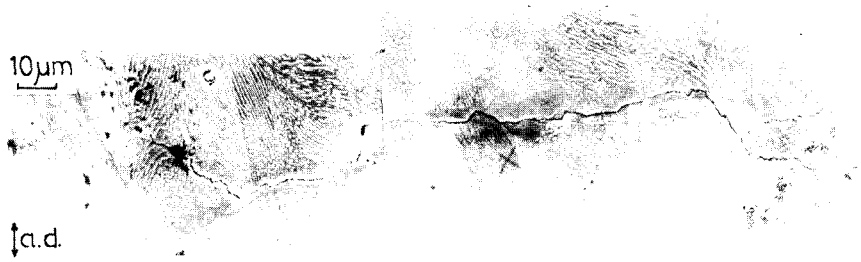

Fig. 4 Typical feature of NPC which propagated along the ferrite band and stopped its propagation in the vicinity of pearlite boundary. Series C, σ_{wo}=231MPa, $N=1.1\times10^7$, $L=1777\mu m$

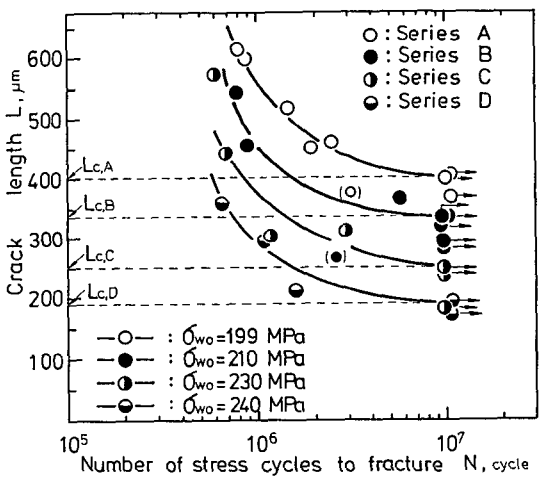

Fig. 5 Evaluation of the maximum allowable crack length (i.e., the critical NPC length) at the endurance limit employing pre-cracked specimens prepared at 10% above the original endurance limit

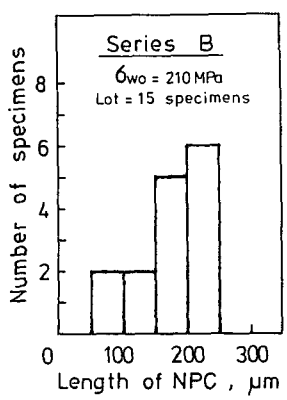

Fig. 6 Histogram giving the length of NPC which is the longest crack of all NPCs in each specimen

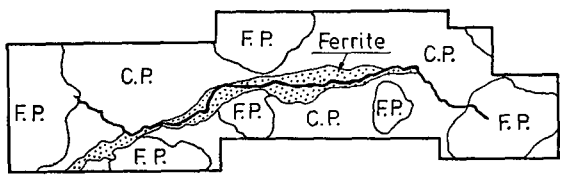

Fig. 7 Typical diagram of Fig. 4, which shows the situation of crack non-propagation in association with pearlite lamella

나타낸 것처럼 D材의 약 절반이다. 그리고, 라멜라 間隔의 감소로 인하여 항복强度도 현저히 상승하고 있음을 Table 2에서 알 수 있다.

이 E材에 대하여, 疲勞限度와 Lc를 求하는 실험을 실시한 결과, σ_{wo}=328MPa, Lc, E=140μm으로 판명되었다. 따라서 이 값들은, D材의 그것(σ_{wo}=240MPa, Lc, D=190μm)과 比較하여 현저히 變化한 값이라고 할 수 있다. 즉, 크랙 先端부근의 퍼얼라이트 라멜라 間隔의 감소에 起因한 퍼얼라이트 조직의 크랙擴大抵抗의 증가는, 該當 재료의 Lc에 영향을 주어 그 값을 감소시키고 있음을 알수 있다.

3.3 疲勞負荷 履歷과 限界停留크랙길이

一般的으로, 疲勞크랙의 크랙面 주위에는 引張性 殘留變形이 남게 되고, 周圍 彈性部의 變形拘束에 起因하는 壓縮性 殘留應力이 誘起된다[9]. 이러한 壓縮性 殘留應力은, 特히 크랙先端部의 開口變位를 억제함으로써, 그 後의 크랙전파擧動에 至大한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[10].

본 연구에서, Lc를 求하는데 사용하고 있는 予크랙材는, 이러한 意味에서 壓縮性 殘留應力등의 疲勞負荷 履歷이 殘存해 있는 크랙이라 볼 수 있

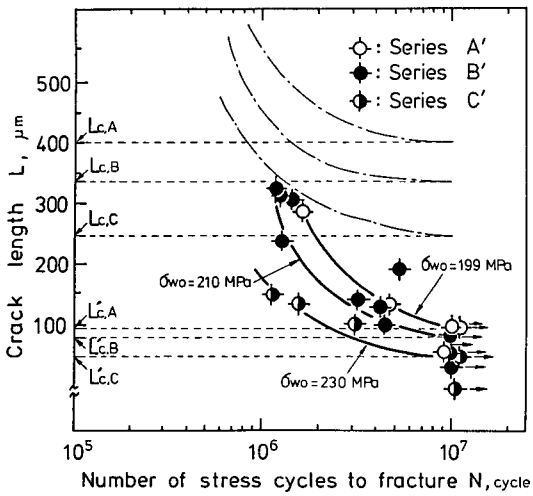

Fig. 8 Evaluation of the critical NPC length at the endurance limit employing annealed pre-cracked specimens

다. 그러므로, 下限界條件의 정확한 파악을 위해서는, 疲勞負荷履歷을 除去한 予크랙材를 가지고 시험하여, 그 결과를 앞 결과와 比較하여 보는것도 흥미있는 일이라 하겠다.

따라서, 이번에는 모든 予크랙材에 640°C 1시간의 眞空燒鈍處理를 실시하여, 殘留應力등의 履歷을 제거한 시험편을 준비하였다. A,B,C材를 對象으로 Lc를 求하는 실험을 실시한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림으로부터, 殘留應力 除去處理가 된 予크랙材의 限界停留크랙길이(Lc'라고 하면)는 Lc', A=95μm, Lc',B=80μm, Lc',C=50μm으로 나타났다. 이 결과들은, 3.1節에서의 결과와 比較할때 大幅 감소한 수치를 보이고 있는데, 이것은 予크랙이 形成되기까지의 負荷履歷이, 그 후의 下限界條件에 중대한 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

3.4 平滑材의 σ_{wo}와 Lc, Lc'와의 關係

우선, 지금까지 구한 Lc 및 Lc'를 各各의 σ_{wo}와 對應시켜 兩對數 方眼紙上에 나타낸것이 Fig. 9이다. E材를 제외한 이들 결과는, 어느 쪽도 Frost가 제안했던[11] 다음 式의 형태로 나타낼 수 있음을 보여 주고 있다.

$$\sigma^m L = C \qquad (1)$$

여기에서, m과 C는 상수로서, σ_{wo} vs. Lc와의 關係에서는, $m=5$, $C=4.2\times10^{10}$ [MPa]^5 · mm인 값을 갖는다.

한편, 퍼얼라이트 라멜라 간격을 작게하여, 크랙

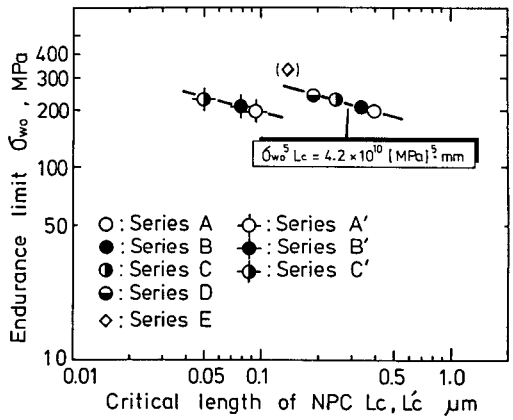

Fig. 9 Quantitative relationship between the endurance limit and the critical NPC length

先端조직을 强化한 E材의 關係는, Fig. 9에서 보는 바와같이, A,B,C,D材의 그것에 비해 强度 레벨의 높은쪽에 위치해 있고, 또한 σ_{wo} vs. Lc'의 결과는 σ_{wo} vs. Lc의 결과의 아래쪽에 위치해 있다. 이들 사항은, 크랙先端 微視조직의 크랙擴大抵抗의 변화 또는 크랙自體에 대한 疲勞負荷 履歷의 有無에 따라서, 크랙전파의 下限界應力이 현저히 변화함을 잘 나타내 주고 있다.

다음으로, Fig. 9를 소위 Kitagawa plot 上에[1] 함께 나타낸 것이 Fig. 10이다. 그림으로부터, 本研究의 결과는 ΔK_{th}=const.의 巨視크랙의 延長線上에서 이탈하여, Region I에서 直線으로 나타나고 있다. Kitagawa plot는 주어진 크랙길이에 대하여 그 전파下限界應力을 求한데 對하여, 本 研究에서는 逆으로, 주어진 疲勞限度應力에 대하여 限界크랙길이를 찾는 방법을 擇하고 있다. 바로 이 方法上의 差異가 두 研究에 있어서 다른 결과를 가

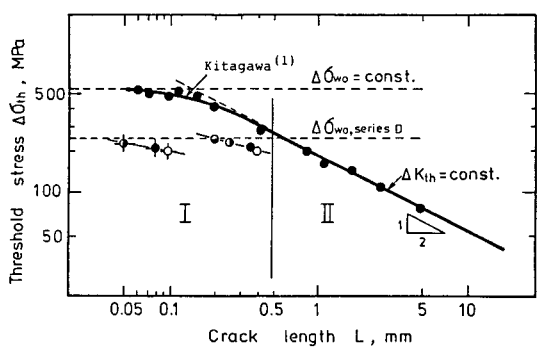

Fig. 10 Comparison between values of present study and 'Kitagawa plot'

져온 要因이라고 볼 수 있는데, 이點은 微小크랙의 微視조직에 敏感한 전파特性에서 비롯되었다고 생각되어진다. 즉, 주어진 크랙이 어떤 應力下에서 일단 전파開始를 하였다 하더라도, 크랙先端 微視조직의 狀況에 따라서는 다시 停留하고, 그것보다 길이가 작은 제3의 크랙이 전파開始를 하는 例는 平滑材의 회전굽힘 疲勞試驗에서는 흔히 있는 일이다[5~8].

Haddad는[12], Region I의 微小크랙 전파條件을, $\Delta\sigma_{wo}$=const.에서 ΔK_{th}=const.에 遷移하는 크랙길이인 L_0를 導入함에 의해, 다음과 같은 式으로 나타내었다.

$$\Delta\sigma_{th}=\frac{\Delta K_{th}}{\left\{\pi\left(\frac{L}{2}+\frac{L_0}{2}\right)\right\}^{\frac{1}{2}}} \tag{2}$$

이 式은 LEFM의 槪念을 微小크랙의 領域까지 擴張한 式이라고 할 수 있겠다.

그러나, 微小크랙의 微視조직에 敏感한 전파特性과 관련한 L_0의 物理的 意味가 충분히 파악되지 않고 있어서, Haddad의 (2)式의 意味는 아직 명확치가 않다. Fig. 11은, 本 硏究의 결과와 Haddad의 결과를 比較圖示한 것으로, 停留크랙의 存在 可能 區域도 해칭으로 나타내어져 있다. 그림으로부터, 本 硏究의 결과는 Haddad의 理論的인 결과에 比해, 平滑材의 疲勞限度가 크랙발생 有無의 限界條件이 아닌 발생한 크랙의 전파 限界條件에 對應한다는 疲勞限度의 本質을 잘 나타내 주고 있다.

Frost가 제안한 式(1)은, 本 硏究에서 취급하고 있는 크랙치수보다 한 位數 큰 巨視크랙의 전파下限界條件을 論한 것으로, 微小크랙의 評價를 目的으로 한것은 아니다. 또한 式(1)은, 序論에서 지적했듯이, 同一 시험편에 발생하는 여러 크랙들 中에서 어느 크랙이 이른바 『限界狀態』에 到達해 있는

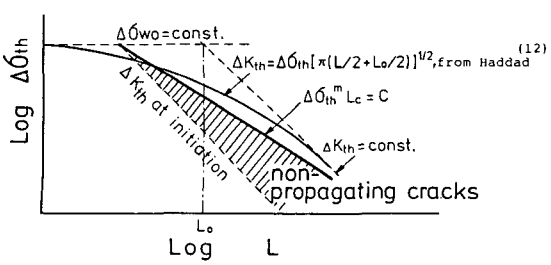

Fig. 11 Comparison between value of present study and Haddad's theoretical value

가를 직접 判定할 수가 없는 관계로, 微小크랙의 범주에서는 언제나 限界條件을 나타내고 있다고 할 수 없다. 그런데, 本 硏究의 Lc는, 該當 負荷下에서 限界狀態에 達해 있음이 직접 확인되었으므로, 式(1)의 σ 및 L대신에, $\Delta\sigma_{th}$ 및 Lc를 代入함으로써 얻어지는 다음 式

$$\Delta\sigma_{th}^{m}\cdot Lc=C \tag{3}$$

은, 微小크랙의 領域에까지 擴張된 Frost 流의 『微小疲勞크랙전파의 下限界條件』을 나타내고 있다고 할 수 있다.

4. 結 論

炭素鋼 平滑材를 사용하여, 疲勞限度下에서의 限界停留크랙길이를 구하고, 疲勞限度와 限界停留크랙길이와의 定量的 관계를 조사함과 동시에, 이와 같은 微小크랙의 전파 下限界條件에 영향을 미치는 몇가지 因子, 즉 微視組織, 疲勞負荷 履歷에 대하여 검토하여, 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 平滑材에 발생하는 微小크랙의 전파 下限界條件을 연구하는데 있어서, 該當 負荷下에서의 전파 下限界狀態에 達해 있는 限界停留크랙을 찾아내는 것이 무엇보다도 緊要하다.

(2) 限界停留크랙의 전파 下限界應力으로서의 疲勞限度의 大小는, 限界停留크랙 길이에 의해서 직접 지배된다.

(3) 疲勞限度 σ_{wo}와 限界停留크랙길이 Lc 사이에는, Frost流의 크랙전파 條件인 $\sigma_{wo}^{m}\cdot Lc=C$인 定量的 관계가 성립한다. 여기에서, m과 C는 상수이다.

(4) 크랙先端 微視組織의 크랙擴大抵抗의 변화, 크랙의 疲勞負荷履歷의 有無에 따라서, 微小크랙의 전파 下限界應力은 현저하게 달라진다.

後 記

本 硏究는 1987년도 전반기 韓國科學財團 연구비에 의하여 수행되었으며, 관계 諸位께 감사 드린다.

參 考 文 獻

(1) Kitagawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M., and Miyashita, S., 1979, "Quantitative Analysis of

Fatigue Process-Microcracks and Slip Lines Under Cyclic Strains", ASTM STP 675, pp.420～449.

(2) Wadsworth, N.J., 1961, "The Influence of Atmospheric Corrosion on the Fatigue Limit of Iron-0.5% Carbon," Phil. Mag. 6, pp.397～341.

(3) 渡邊, 熊田, 1961, "平滑疲れ試驗片における非進行性 crackと疲れ强さ", 日本機械學會 講演前刷集 No. 37, pp.67～69.

(4) Hempel, M., 1965, "Metallographic Observation on the Fatigue of Metals", Proc. Int. Conf. on Fatigue of metals, IME, pp.543～548

(5) 西谷, 西田, 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312號, pp.1385～1393.

(6) Kunio, T., Yamada, K., 1979, "Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Non-propagating Fatigue Cracks in Martensitic-Ferritic Structure", ASTM STP 675, pp.342～370.

(7) 大久保, 酒井, 1967, "疲れき裂の發生と傳ぱ", 日本機械學會論文集, 第33卷, 第248號, pp.495～502.

(8) 中澤, 小林, 森田, 飯倉, 宮內, 石井, 1974, "結晶粒の大きちを變えた低炭素鋼 平滑および切ケき材の疲れき裂の 擧動と 疲れ限度", 日本機械學會論文集, 第40卷, 第329號, pp.9～19.

(9) 中澤, 小林, 1968, "金屬の疲れき裂の擧動", 機械の研究, 第20卷 第10號, pp.1384～1391.

(10) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp.230～242.

(11) Frost, N.E., 1959, "A Relation Between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel", Proc. Inst. Mech. Engrs. 173-35, pp.811～827.

(12) El Haddad, M.H., Smith, K.N., and Topper, T.H., 1979, "Fatigue Crack Propagation of short Cracks", Trans. ASME J. Eng. Mater. Technol. 101, pp.42～50.