

〈論 文〉

構造用 鋼材에 發生하는 微小疲勞 크랙의 停留要因

金 敏 健*

(1990년 10월 15일 접수)

Critical Aspect of Non-Propagation of Short Fatigue Crack in Structural Steel

Min-Gun Kim

Key Words: Carbon Steel(炭素鋼), Fatigue(疲勞), Short Crack(微小크랙), Non-Propagating Crack(停留크랙), Crack Closure(크랙閉口), Residual Stress(殘留應力)

Abstract

Measurements and observation on the closure behavior of short fatigue non-propagating crack (NPC) in plain carbon steel show that the crack tip is closed even under the peak stress level at the endurance limit. Compressive residual stress which is induced around the crack tip is considered to be the main factor causing the crack closure, consequently NPC is exist due to the closure of crack tip. It is also discussed about the relationship between the effect of understressing and the existence of NPC. It is found that the understressing effect is closely related to the existence of NPC through the crack closure behavior.

1. 序 論

최근, 著者は 탄소강의 疲勞限度가 停留크랙중에서 最大길이를 갖는, 이른바 限界停留크랙의 전과 限界應力과 一致함을 指摘하였다⁽¹⁾. 그런데, 이러한 限界停留크랙은 명확한 전과과정을 거친 第2段階 크랙으로, 그 길이도 결정粒子的 數培에서 數十培에 達하는 것으로서, 이러한 停留크랙의 生成機構에 關한 疑問은 아직도 남겨져 있다.

크랙이 전과할때 크랙破面에는 引張의 塑性變形이 남게되고, 이것이 크랙面에 物質이 挿入된 것과 같은 狀態가 되어 ΔK_{eff} 의 감소를 초래케 되는데, 이와같은 소위 Elber류⁽²⁾의 크랙閉口現像은 疲勞크랙의 전과, 停留를 논할때 基本的인 意味를 갖게된다. 또한 Nisitani등은, 微小圓孔에서 生成, 전과한 약 1mm크기의 停留크랙에 대한 크랙閉口變位

(COD)를 측정한 결과, 크랙의 先端은 표면에서 보는한 最大應力時에도 거의 開口하지 않음을 밝히고 있다⁽³⁾. 즉, 疲勞크랙先端部에 誘起되는 壓縮殘留應力이 有效한 應力범위를 減少시키는 결과를 초래하게되어, 停留크랙을 生成시킬수 있다는 견해이다. 어느쪽이나 微小停留크랙의 生成機構를 생각하는경우, 크랙閉口現像이 중요한 의미를 갖고 있음을 시사하고 있다.

그렇지만, 平滑材의 疲勞限度 應力下에서 관찰되는 疲勞크랙들이 停留하는데 있어서, 어느 메커니즘이 더욱 有力한가를 구분짓는 것은 어려운 일이다. 예를들어 노치부로부터 生成되는 긴 停留크랙의 경우는, 平滑材의 그것에 비교해 殘留變形이 크다고 생각되므로 Elber가 말하는 크랙閉口現像도 현저하게 생길것으로 생각되지만, 사실 平滑材의 微小크랙의 경우에는 Elber류의 閉口가 크랙停留의 基本的 要因이 될 것이냐 아니냐는 아직 명확하지 않다. 또한 지금까지의 COD의 측정결과들은 한결 같이 크랙表面上에서 만 이루어져 있어서, 크랙전

* 正會員, 江原大學校 工科大學 機械工學科

파에서 더욱 중요한 길이방향에서의 상황은 전혀 예측하지 못하고 있다. 그리고 크랙停留現象과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있는 最小應力效果, coxing效果 등과 크랙閉口現象과의 관련성이 밝혀지고 있지 않아서, 停留크랙의 生成기구에 대한 명확한 結論은 아직 얻어지지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는, 이미 크랙전파의 第2段階에 있는 平滑材의 停留 크랙을 대상으로, COD를 高精度度로 측정하는 것을 주된 手段으로하여, 疲勞限度의 存在有無를 支配하는 微小크랙의 停留機構를 詳細히 밝히고자 한다. 또한 變形時效에 근거한 現象으로만 알려졌은 過小應力效果, coxing效果를 크랙閉口現象의 관점에서 檢討하여, 크랙停留現象의 본질적인 이해를 얻고자 한다.

2. 試驗材料 및 實驗方法

사용된 재료는 共析鋼 丸棒으로, 그 化學成分과 熱處理條件을 Table 1에 나타내었다.

열처리후, 기계가공에 의하여 試驗部 最小직경 $\phi 9$, R20으로 加工한 결과, 試驗片 表面에는 脫炭 조직이 약 6%에 걸쳐서 生成되어 있었다. 이 탈탄 페라이트 조직을 발생시킨 이유는, 그후의 疲勞試驗에서 크랙발생의 우선 장소를 제공하기 위함이다. 또한 크랙이 페라이트를 따라 충분히 성장한 후 (2단계크랙으로)주위의 퍼얼라이트 조직속에서 停留하는 탄소강의 전형적인 停留크랙의 형태를 얻을수가 있기 때문이다.

기계가공후, 試驗片은 기계가공의 영향을 제거하기 위해서 640°C 1시간의 眞空燒鈍을 실시하고, 전해연마로 최종 연마하였다. 疲勞試驗에 사용한 試驗機는 회전굽힘 疲勞試驗機(3000rpm)이다. 試驗片的 기계적 성질과 疲勞限度는 Table 2와 같다.

크랙 開口變位(COD)를 측정하기 위한 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. 우선 크랙양쪽에 비커스 압자로 표점을 찍어놓고, 현미경과 TV카메라를 통하여 크랙 영상을 모니터 스크린에 약 4000배로 비추어 내어, 연결된 자동 측정장치에 의해 應

Table 2 Mechanical properties and endurance limit

0.2% Proof stress (MPa)	277
Ultimate tensile strength (MPa)	714
Endurance limit (MPa)	210

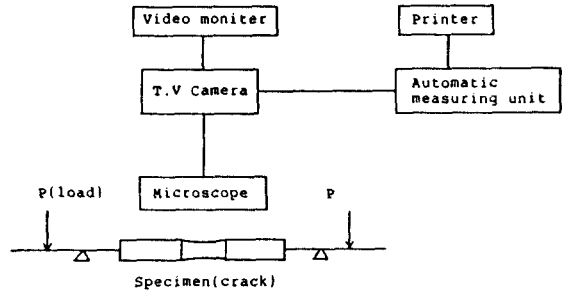


Fig. 1 Automatic C.O.D measuring unit

力負荷 前後의 표점 거리를 $\pm 0.1\mu m$ 精度度로 측정하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 SRA에 따른 停留크랙의 開口舉動의 變化

서론에서 言及한 바와 같이, 疲勞크랙 주위에 誘起되는 壓縮殘留應力에 의한 크랙 停留 可能性이 인정되고 있으므로, 본 연구에서도 우선 이점부터 자세히 검토하기로 한다.

먼저, 平滑材에 發生한 길이 $140\mu m$ 과 $90\mu m$ 의 停留크랙을 준비하여, 양자 공히 가볍게 전해연마를하여 이미 발생해 있는 슬립밴드를 완전 제거하였다. 그리하여, 전자는 그 狀態 그대로, 후자는 640°C 1시간의 SRA(stress relieving annealing)를 실시 한 후 재차 疲勞限度應力인 $\sigma_{wo}=210MPa$ 에서 疲勞試驗을 행하였다. 그 결과, 전자의 試驗片은 $N=10^7$ 회의 負荷후에도 파단하지 않고, 길이 $140\mu m$ 의 停留크랙 길이는 전혀 변화가 없었다. 또한, 크랙先端部 영역에 새로운 슬립의 발생도 관

Table 1 Chemical composition and heat treatment condition

Chemical	Composition	wt%	Heat treatment condition
C : 0.84	Si : 0.22	Mn : 0.45	P : 0.014
Cu : 0.03	Ni : 0.02	Cr : 0.10	S : 0.027
1200°C 2hr Annealing			



Fig. 2 Slip bands appeared during the cyclic loading following the stress relieving annealing

찰되지 않았다. 한편, SRA를 실시한 後者의 경우는, $N=5 \times 10^5$ 회의 負荷後 試驗을 중단하여 관찰한 결과, 크랙은 새로이 전파를 개시하여 Fig. 2에 보는 것과 같이 크랙先端에는 새로운 슬립밴드를 형성하고 있음을 알았다.

이러한 實驗결과들은, 平滑材의 微小停留크랙의 停留요인이 SRA에 의해 消滅함을 말해주고 있다. 특히, 크랙先端의 슬립밴드 형성이 SRA처리를 행한 크랙에서만 관찰된다는 사실은, 疲勞限度應力에서 SRA전의 停留크랙은 그 先端이 閉口된 狀態이며, 한편 SRA에 의해 국소적 壓縮殘留應力이 해방된 크랙의 경우에는, 壓縮殘留應力の 제거에 따라 크랙先端의 開口를 가져왔다고 일단 추정할 수가 있다.

과면에 塑性變形이 殘留하는 疲勞크랙의 Dugdale-Barenblatt 모델에서, 최대應力擴大係數 K_{max} 가 負荷될 때의 크랙 先端單調部 塑性域 크기 R_m 은, σ_y 를 항복應力이라 하면 식 (1)로 나타낸다⁽⁴⁾.

$$R_m = \pi/8 (K_{max}/\sigma_y)^2 \quad (1)$$

$K=K_{max}$ 에서 임의의 K 까지 負荷하면 單調塑性域 내에 역 항복이 생겨서, 반복 塑性域이 생기게 된다. 이 반복塑性域의 크기 R_c 는 無負荷에 달하기 以前의 $K=K_{ci}$ 에서 크랙이 閉口하는 것을 고려하

면, 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$R_c = \pi/8 \{ (K_{max} - K_{ci}) / 2\sigma_y \}^2 \quad (2)$$

식 (1), (2)로부터 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{K_{ci}}{K_{max}} = 1 + 2\sqrt{\frac{R_c}{R_m}} \quad (3)$$

그런데, 停留크랙에 疲勞限度의 應力を 再次 負荷할 경우 크랙先端에 새로운 슬립이 전혀 출현하지 않는다는 사실은 $R_c \approx 0$ 임을 말해주고 있고, 따라서 開口比 $K_{ci}/K_{max} \approx 1$ 이 되어 크랙先端部는 K_{max} 下에서도 거의 閉口하지 않는다고 할 수 있다.

또한 앞의 實驗結果는, 停留크랙이 表面에서 뿐만 아니라 깊이방향에서도 상당한 깊이까지 閉口한 狀態임을 시사해주고 있는 것이다. 왜냐하면 停留크랙의 표면층을 전해연마로 제거하더라도 크랙은 계속 停留狀態로 남아 있음을 보여주고 있기 때문이다.

다음절에서는, 이러한 추정을 직접 COD 측정을 통하여 上記 사실들을 立證해 보고자 한다.

3.2 停留크랙 先端部の 閉口現象

일반적으로, 負荷時의 疲勞크랙의 先端部에는 引張塑性變形에 대한 주위 탄성부의 變形구속에 기인하는 壓縮殘留應力이 誘起되어, 이 壓縮의 殘留應力場은 크랙의 閉口를 억제시켜 크랙전파의 억제 효과가 있음이 알려져 있다⁽⁵⁾. 따라서, SRA에 따른 殘留應力の 해방도 당연히 크랙의 閉口거동에 변화를 가져올 것으로 생각되므로, 停留크랙에 대하여 SRA 전후에서의 COD 측정을 행하기로 하였다.

우선, 길이 $500\mu\text{m}$ 의 停留크랙을 준비하여 疲勞限度와 같은 $\sigma_{wo}=210\text{MPa}$ 의 정적 굽힘應力을 負荷하여 크랙先端부의 開口變位를 조사하였다. 無負荷時를 기준으로 하여 구한 COD를 Fig. 3에 곡선 (1)로 도시하였다. 동 곡선은, 最大應力 負荷시에도 크랙 先端으로부터 $X=40\mu\text{m}$ 의 위치까지 閉口한 狀態임을 보여주고 있다. 동일재에, SRA를 실시한 후 동등한 負荷조건하에서 조사한 COD를 Fig. 3 중의 곡선 (2)로 나타내었다. 동곡선으로부터, SRA후의 COD는 전과 비교하여, $X=40\mu\text{m}$ 의 위치까지에 걸쳐서 증가하고 있으며, 크랙先端은 명확히 開口하고 있음을 알 수 있다.

이 사실로부터, 平滑材의 停留크랙은 疲勞과정 중에 誘起된 壓縮의 殘留應力에 의해 크랙先端부가 閉口되어 生成된다고 일단 결론 지을 수가 있다. 그러나, 어떠한 형태의 殘留應力이 誘起되어서 크랙

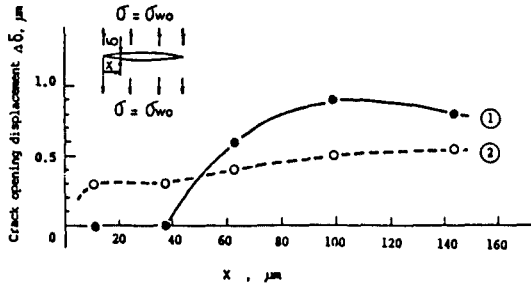


Fig. 3 Crack opening displacement in the vicinity of the NPC before (curve marked ①) and after stress relieving annealing (curve marked ②)

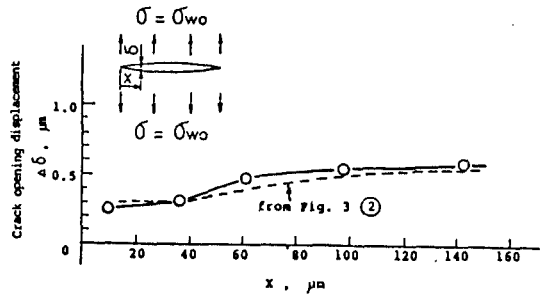


Fig. 4 Crack opening displacement in the vicinity of crack after re-yielding structure of crack front

의 어느 범위까지 영향을 줄 것인가는 아직 미지수이며, 이러한 殘留應力에 의한 크랙閉口와 소위 Elber 류의 크랙閉口와의 相關성도 아직 議論되지 않았다.

3.3 停留크랙 先端部의 壓縮 殘留應力の 분포

크랙先端 前方의 永久塑性變形으로 비롯되는 壓縮殘留應力만이 全적으로 크랙先端部 閉口를 유발시키느냐 아니냐를 정확히 가리기 위해서, Fig. 3의 곡선(2)를 구했던 試驗片을 가지고 다음과 같은 實驗을 행하였다.

즉, SRA에 의해 원상회복된 크랙先端 前方組織을 $\sigma = \sigma_y$ 하게 10회 負荷하여 재항복 시킨다음, 앞서의 방법과 동일 요령으로 COD를 측정하여 Fig. 4에 도시하였다. 동 그림중에는 비교를 위해 Fig. 3의 곡선(2)의 결과도 파선으로 나타내었다.

그림으로부터, 두 조건은 거의 동일한 COD를 나타내고 있어서, SRA후 크랙先端 前方 조직을 재항복 시켜서 壓縮殘留應力을 재발생 시킨것 만으로는 크랙先端部의 閉口를 가져오지 못함을 알 수 있다. 또한 동일 試驗片을 $\sigma_{wo} = 210\text{MPa}$ 에서 再負荷한 결과, 크랙은 전과성 크랙으로 변화하여 다시 전과 開始한 사실도 이 결과를 뒷바침 해주고 있다. 이 크랙은 $40\mu\text{m}$ 를 더 전과한 후 다시 停留하였다.

따라서, 疲勞크랙에서 크랙前方뿐만 아니라 後方에도 殘留應力이 존재하여 크랙閉口에 기여하고 있음을 알 수 있어 Fig. 5와 같은 狀態를 상상할 수가 있다. 즉, 無負荷時 크랙이 입을 다문狀態에서는 크랙의 前方에는 강력한 壓縮殘留應力이 형성되게 되고, 後方에도 面壓의 형태로 壓縮殘留應力이

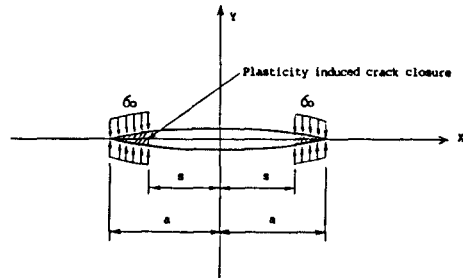


Fig. 5 Fatigue crack model during the tensile loading

분포한다. 그러나 이 後方の 殘留應力은 引張하중이 가해지기 시작하면 크랙면이 열리는 부분부터 殘留應力이 소실되면서 크랙면을 돌출시키게 함으로서, 소위 Elber류의 크랙閉口를 가져오게 되겠지만, 크랙先端 後方の 일정한 부분까지는 최대應力 負荷시에도 閉口하고 있지 않는 관찰결과로 미루어, 이 부분은 引張負荷의 상당한 부분까지 壓縮의 面壓이 계속 작용하고 있는 것으로 믿어진다. 이와 같은 사실은 전술한 바와같이 SRA후의 크랙이 그 후 어느정도 전과하다가 다시 停留한다는 實驗 결과가 잘 뒷바침 해주고 있다. SRA에 의해 殘留應力은 물론 크랙면의 塑性돌출부까지도 어느정도 원상회복 된다고 한다면, 그 후의 負荷로 어느정도의 新크랙면의 출현이 크랙을 停留시키는데 필요하다고 할 수 있기 때문이다. 또한 크랙後方の 일정 범위까지 壓縮殘留應力이 존재한다는 가정은 X線을 이용한 Natsume의 殘留應力 측정결과와도 잘 부합하고 있다⁶⁾.

Fig. 5에서, 크랙면 (a-s) 영역에 殘留塑性층이 挿入되어 閉口된 狀態로 σ_0 의 面압이 거의 일정하

게 작용한다고 가정하면, 無限平版中 2차원 크랙의 경우에는 식 (4)와 같은

$$\begin{aligned}
 K_r &= \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_0(\xi) \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} d\xi \\
 &= \frac{2\sigma_0\sqrt{\pi a}}{\pi} \int_s^a \frac{d\xi}{\sqrt{a^2-\xi^2}} \\
 &= \frac{2\sigma_0\sqrt{\pi a}}{\pi} \arccos\left[\frac{s}{a}\right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

크기의 殘留應力으로 인한 應力擴大係數가 존재할 것으로 생각되며⁽¹⁴⁾, 이로 인하여 ΔK_{eff} 는 그만큼 減少한다고 볼 수 있다.

3.4 過小應力效果와 크랙閉口現像

鐵鋼材에는, 過小應力效果 또는 코우크싱 效果가 존재한다고 오래전 부터 알려져왔다⁽⁷⁾. 過小應力效果란, 疲勞限度보다 낮은 應力을 多數回 받으면 處女材 보다도 오히려 疲勞에 대한 抵抗이 증가하는 現像을 말하는데, 이 效果는 강재의 S-N곡선의 형태, 특히 knee의 출현 여부와 밀접한 연관이 있다⁽⁸⁾. 바꾸어 말하면 knee의 출현은 곧 크랙의 停留와 직결된 現像⁽⁹⁾이므로, 이 效果는 크랙停留기구와 관련을 맺고 있다고 할 수 있다.

從來부터, 過小應力效果, 코우크싱 效果의 원인으로 疲勞과정중의 變形時效⁽¹⁰⁾가 指摘되어 왔는데, 날카로운 knee의 출현(즉 疲勞限度의 존재)이 變形時效 만으로는 설명할수 없는 이상, 그 以外の 要因이 존재할 것이라고 충분히 생각할 수 있다. 따라서, 本節에서는 停留크랙 生成요인으로 밝혀진 크랙閉口現像을 가지고 最小應力效果의 설명을 시도해 보려고 한다.

우선, 길이 650 μ m의 疲勞크랙을 도입한 試驗片을 준비한 후, COD를 측정하여 그 결과를 Fig. 6의 파선으로 나타내었다. 다음은 동일 크랙에 Fig. 7에 도시한 것과 같은 過小應力을 순차적으로 10⁷회씩 負荷하여 나간 결과, 재료에는 過小應力效果가 나타나 최종적으로는 平滑材의 疲勞限度에서도 파단함이 없이 10⁷회 이상 건담을 확인하였다. 길이 650 μ m의 豫크랙은 試驗片의 限界停留크랙길이의 약 2배에 달하는 것으로⁽¹⁾ 過小應力效果 없이는 疲勞限度 應力에서 즉시 전과개시 파단할 크랙이다. 이렇게 모든 段階의 應力負荷를 마친 크랙에 대하여 또다시 전과 동일하게 COD를 조사하여 Fig. 6에 실선으로 나타내었다.

Fig. 6으로부터, 過小應力 負荷전, 最大應力 負

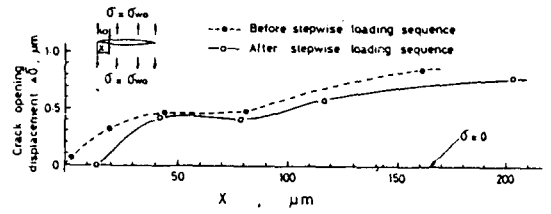


Fig. 6 Change in crack opening displacement before and after stepwise loading sequence

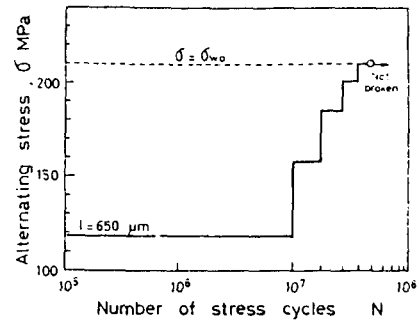


Fig. 7 Example of stepwise loading sequence on the fatigue pre-cracked specimen

荷시 閉口狀態였던 크랙의 先端部가 負荷후에는 閉口로 이행함을 명확히 알 수 있다. 즉, 變形時效의 결과로만 알려져 왔던 過小應力의 效果가, 최종적으로는 크랙 閉口現像을 통하여 나타나는 것이라고 결론지을 수 있다. 그러나 여기서의 크랙 閉口の 메카니즘은 전술했던 壓縮殘留應力 또는 Elber류의 閉口現像 이외의 것이 작용하는 있음을 시사해 주고 있다. 그것은 過小應力負荷중 크랙전파의 정지

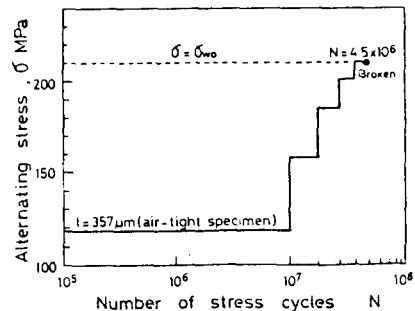


Fig. 8 Example of stepwise loading sequence on the air-tight pre-cracked specimen

또는 아주느린 전과과정 동안에 생겨날 수 있는 요인을 말하는 것으로, fretting oxide를 생각할 수가 있다. 크랙파면에 生成되는 산화물은 소위 산화물 誘起크랙閉口⁽¹¹⁾를 유발시키는데, 장시간의 過小負荷 동안에 충분히 生成될 수 있을 것으로 생각된다. 이점을 명확히 확인하기 위하여, 공기를 차단하여 산화물의 生成을 억제한 또하나의 豫크랙재를 준비하여 實驗함과 동시에, 크랙의 파면에서 산화

물 존재 有無를 직접 관찰하기로 하였다.

우선, 길이 360 μm 의 豫크랙재를 준비하여, 크랙을 완전히 레프리카로 감싸서 實驗中 공기중의 산소 및 수분의 유입을 차단한 후, Fig. 7과 동일한 過小應力을 負荷 하였다. 그 결과 Fig. 8에서 보는바와 같이, 최종 疲勞限度의 負荷도중 $N=4.5 \times 10^6$ 회에서 破斷하였다. Fig. 7에서 實驗했던 크랙길이 보다도 짧은 크랙임에도 불구하고 疲勞負荷도중 파단했다는 사실은, 過小應力負荷중 生成될 것으로 기대됐던 산화물이 크랙 閉口現像과 밀접히 관련 되어 있음을 분명히 해주고 있다.

다음으로, 試驗片을 液體窒素 속에서 파단시켜, 크랙파면의 직접관찰을 통하여 산화물의 존재유무를 확인하였다. Fig. 7에서 최종 사용했던 길이 650 μm 의 크랙파면 사진을 Fig. 9에 보였다. 사진 중 (b)는 (a)의 사각형 b부분을 확대한 것이고, (c)는 블랭크 레프리카법⁽¹²⁾에 의해 破面에서 酸化물을 제거한 後의 同一장소 사진이다. 사진 (b)와 (c)를 자세히 비교해 보면, 예를들어 (b)중의 작은 화살표로 지지하고 있는 산화물의 존재를 확인할 수 있다.

以上 記述한 사실들로 부터, 過小應力效果(코우크싱 效果도 동일하다고 생각됨)는 궁극적으로 酸化物 또는 變形시효**에 기인한 크랙閉口로 말미암아 나타나는 강화現像으로 이해될 수 있으며, 停留 크랙의 존재, 疲勞限度의 존재등과 그 原因을 같이 하고 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

炭素鋼 平滑材에 發生하는 微小停留크랙의 詳細한 관찰과 開口變位の 精密한 測定을 通하여, 疲勞限度의 有無를 支配하는 微小크랙의 停留要因에 대하여 檢討한 결과, 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 平滑材의 微小停留크랙은, 疲勞過程中에 크랙先端 前方과 後方に 誘起되는 壓縮殘留應力이 크랙先端部の 開口를 抑制함에 의해 停留한다.

(2) 크랙停留現像과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있는 過小應力效果, coxing 效果는 궁극적으로 크랙開口에 근거하여 나타나는 現象으로 이

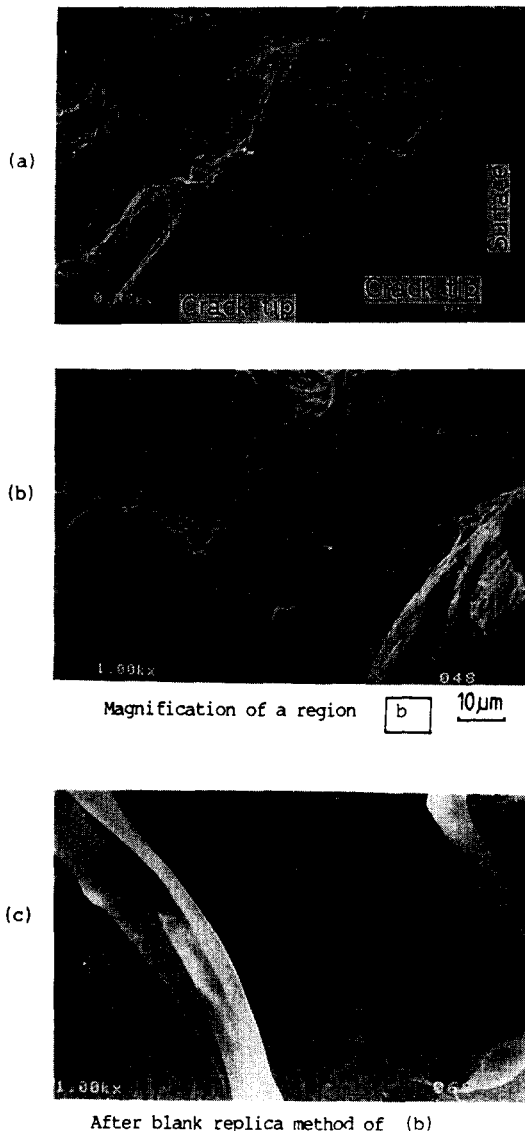


Fig. 9 Fracture surfaces in the vicinity of crack tip showing the oxide corrosion forming

** 變形시효로 인한 크랙先端部 재질의 강화는, 그후 負荷에서 크랙의 開口를 억제하여 ΔK_{eff} 를 감소 시킨다 (13)

해 될 수 있어서, 停留크랙의 存在와 그 原因을 같이하고 있다.

後 記

本 研究는 1989년도 전반기 韓國科學財團 연구비에 의하여 수행되었으며, 관계 諸位께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 金敏健, 1988, "炭素鋼 微小疲勞크랙 전파의 下限界 條件", 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第3號, pp.505~512.
- (2) Elber, W, 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp.230~242.
- (3) 西谷, 高尾, 1974, "1 應力사이클間における停留키裂先端部の舉動", 日本機械學會論文集, 第40卷, 第338號, pp.2725~2733.
- (4) 小林, 1982, "疲勞키裂進展に關する最近の研究", 日本金屬學會會報, 第1卷 第5號, pp.329~338.
- (5) 本田, 鳥居, 戶井, 元本, 1981, "키裂材의 疲勞키裂進展に及ぼす 殘留應力場의 影響", 材料, 第31卷, 第348號, pp.908~914.
- (6) 夏目, 宮川, 1989, "疲勞키裂開閉口舉動의 殘留應力的 檢討", 日本機械學會論文集, 第55卷, 第514號, pp.1286~1292.
- (7) 例를 들면, Kommers, J.B., 1930, Proc. ASTM, 30, pp.368.
- (8) 清家, 北岡, 1976, "炭素鋼平滑材의 疲勞限度와 微視的 龜裂ならびに 過小應力效果について", 材料, 第26卷, 第281號, pp.190~196.
- (9) 西谷, 田中, 戶高, 1979, "S15C 低溫燒入れ時效材의 코킹싱效果와 微視的키裂의 關係", 材料, 第29卷, 第317號, pp.143~149.
- (10) 戶 梶, 安藤, 牛田, 1977, "回轉曲げおよび繰返しねじりによる低炭素鋼의 疲勞強度に及ぼす過小應力의 影響", 材料, 第26卷, 第291號, pp.1218~1224.
- (11) Suresh, S., Zamiski, C. F., Ritchie, R. O., 1981, "Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior", Met. Trans., 12A, pp. 1435~1443.
- (12) 小寺澤 編著, 1981, "フラクトグラフィとその應用", 日刊工業新聞社.
- (13) 金敏健, 山田, 國尾, 1985, "低溫燒入れ材의 微小疲勞키裂進展停留舉動に及ぼす室溫時效의 影響", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第471號, pp. 2564~2575.
- (14) 岡村, 1976, "線形破壊力學入門", 培風館, 東京, pp.41~42.