

〈論 文〉

室溫時效 및 變形時效가 微小 疲勞크랙의 開口變位에 미치는 影響

김 민 건*

(1994년 7월 11일 접수)

Influence of Room Temperature and Strain Aging on the COD for a Small Fatigue Crack

Min-Gun Kim

Key Words : Fatigue(疲勞), Carbon Steel(炭素鋼), Endurance Limit(疲勞限度), Room Temperature Aging(室溫時效), Strain Aging(變形時效), Crack Opening Displacement(크랙開口變位), Critical Non-Propagating Crack(限界停留크랙), Small Crack(微小크랙)

Abstract

The effects of room temperature and strain aging treatment are discussed on the critical condition for the onset of growth of non-propagating cracks on 0.15% C low carbon steel, with special emphasis on the length of the critical non-propagating crack and on the crack opening displacement(COD) at the crack tip. It is found from the experimental analysis that room temperature and strain aging of a fatigue pre-cracked specimen introduced the closure of a crack tip of the pre-crack and the reduction of crack opening displacement at the wake of crack, together with an improvement in crack growth resistance of the microstructure. This may cause an increase in the endurance limit of the specimen, through the enhancement of effective stress for the onset of growth of the critical non-propagating crack.

1. 서 론

鋼의 疲勞限度에 직접 관련되는 미소크랙의 停留 조건 또는 停留크랙의 전과개시 조건은, 미소크랙이 거시크랙으로 遷移할 때의 舉動과 관계가 있으며, 이 거동을 規定하는 要因의 하나로서 크랙 閉口現象을 지적하였다. (1,3,12,13) 著者は 미소크랙의 경우, 크랙 閉口를 가져오는 기본적인 요인은 피로과

정중에 誘起된 크랙주변의 壓縮殘留應力이라고 報告하였으며, (3) 또한 피로크랙의 先端이 開口로부터 閉口상태로 이행되는 과정에 대한 第2相 조직의 존재, 또는 過小應力の 階段式 負荷 등을 포함하는 負荷履歷의 영향을 고려하여야 한다는 사실도 지적한 바 있다. (3,4) 특히, 過小應力の 階段式 負荷에 따라서 負荷過程中 크랙先端이 開口로부터 閉口의 상태로 변하여, 이것에 의하여 限界停留크랙길이(6)의 2배가 넘는 크랙을 停留크랙화시킨 경우도 보고하였다. (4) 一般的으로 현재까지 보고된 연구에 의하면 코우크싱效果(coaxing effect)는 주로 變形時

*정회원, 강원대학교 기계공학과

效에 기인하는 크랙 先端部の 材質強化에 의한 것으로 이해되고 있고, (6) 또한 室溫時效에 의한 재질 강화도 바로 疲勞限度의 상승을 가져오게 된다. 따라서, 變形 또는 室溫時效가 크랙開口현상에 미치는 影響의 究明은, 疲勞限度의 상승을 지배하는 要因을 명확히 하기 위한 直接的인 根據를 제시하게 될 것으로 생각된다.

따라서 本 研究에서는, 室溫에 放置하는 것만으로도 현저하게 硬度의 상승을 보이는 SM15C 低溫 담금질材 및 어닐링材를 사용하여, 코우크싱 負荷에 의한 變形時效 및 室溫의 時效處理가 限界停留 크랙의 길이 변화 및 이와 관련된 미소 크랙의 開口變位(COD)에 미치는 影響에 대하여 檢討하였다.

2. 시험편의 준비 및 실험방법

사용한 재료는 SM15C 丸棒으로 그 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 재료는 Table 2에 나타낸 것과 같이, 3종류의 서로 다른 열처리 및 時效 처리를 실시하여 각각 A材, B₁材 및 B₂材로 구별하였다. 특히 B₁材에 대해서는, 時效의 진행을 억제하기 위해 실험直前까지 -18°C에 보관하였다. 母相 平均結晶粒徑은 A材에서 21 μm, B₁材 B₂材에서 공히 35 μm이었다. B₁材의 금속현미경 조직사진을 Fig. 1에 나타내었다.

시험편은 시험部 最小直徑 φ9, R20의 거의 平滑材로 간주할 수 있는 형상으로 가공하였으며, 사용한 시험기는 회전 굽힘 피로시험기(3000 rpm)이다.

크랙開口變位(COD)를 측정하기 위한 장치는

Table 1 Chemical composition of specimen material (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.24	0.44	0.016	0.021

Table 2 Heat treatment and aging condition.

Series A	An.→Ma.→Vacuum annealing(640°C 1hr)→Ep
Series B ₁	An.→LTQ→Ma.→Ep→Keep at -18°C
Series B ₂	An.→LTQ→Ma.→Ep→Room temp. 720hr aging

An. : 900°C 2hr furnace cooling Ma. : Machining
 LTQ : Low Temperature Quenching(700°C 100 min quenching into 10% salt solution at 20°C)
 Ep : Electropolishing

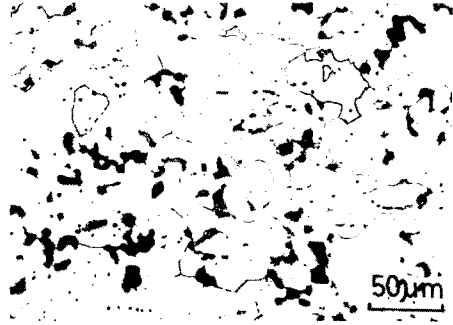


Fig. 1 Microstructure of series B₁

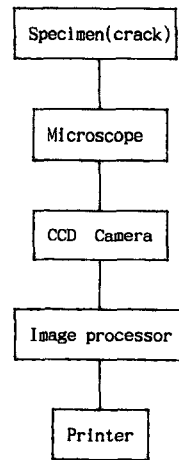


Fig. 2 Automatic COD measuring apparatus

Fig. 2와 같이 구성하였다. 우선 광학 현미경 상에 나타난 크랙의 영상을 CCD카메라를 이용하여 NTSC신호로 변환하고, 이것을 고선명 TV모니터에 1200배로 확대한후 자동 계측장치와 PC의 영상 입력·편집보드를 이용한 이미지프로세싱(image processing)을 통하여 COD를 정밀 계측하였다. 이러한 장치는 영상의 저장, 재생, 편집이 가능한 것이 그 특징이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 室溫時效에 따르는 機械的 성질의 변화

Fig. 3은 低溫 담금질 B₁材의 時效진행상태를 페 라이트 粒内の 硬度변화로 나타난 時效曲線이다. 硬度値는 B₁材의 상태인 H_v=134에서 약 30일후에 최고치인 H_v=183에 달하여 B₂材의 상태로 된다. 따라서, 실온시효처리 後의 경도치는 前과 비교하여 약 35% 정도 상승하였다.

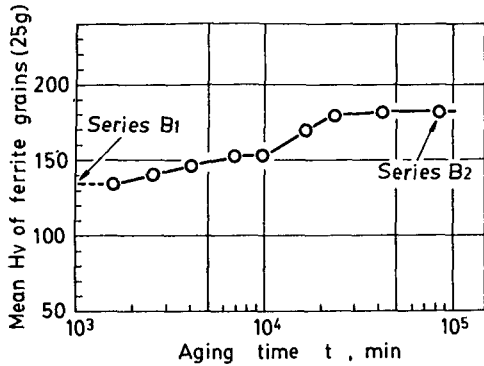


Fig. 3 Aging curve of low temperature quenched specimen

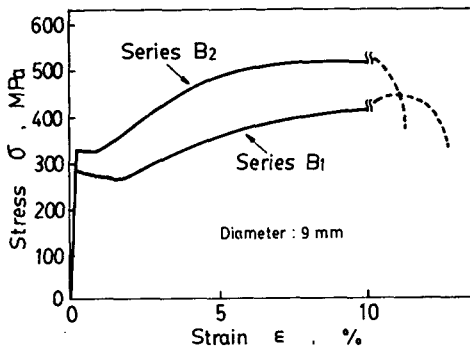


Fig. 4 Comparison of stress-strain diagram in specimen B₁ and B₂

Fig. 4은 B₁材와 B₂材의 응력-변형률 선도이다. B₂材는 B₁材를 30일간 室溫時效시킨 것으로, 기계적 성질도 B₁材와 비교하여 항복응력에서 20%, 인장강도에서 14%만큼 상승하였다.

3.2 室溫時效에 따르는 限界停留크랙길이 L_c의 변화

時效처리에 의한 疲勞限度의 변화를 조사하기 위하여 A材, B₁材 및 B₂材에 대하여 피로시험을 행하여, 그 결과를 S-N 곡선으로 Fig. 5에 나타내었다. 各材의 疲勞限度 σ_{wo} 는 A材, B₁材, B₂材 順으로 각각 179 MPa, 230 MPa, 253 MPa이었다.

그런데, 이들 疲勞限度는 母相 平均 結晶粒徑의 대략 10배의 크기를 가지면서 第2段階에 達해 있는 限界停留크랙의 전과개시조건에 의해 결정되므로, (5,7,8) B₁材 및 B₂材의 피로한도의 상승은 이들 限界停留크랙의 크기와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 따라서, 우선 低溫 담금질 直後 B₁材의 피로

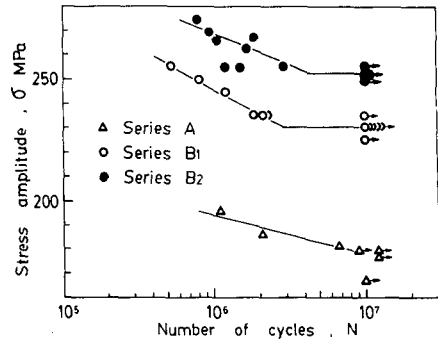


Fig. 5 S-N curve

한도의 大小를 지배하는 限界停留크랙길이 L_{c,B1}을 既報에서 기술한 方法(5,8)을 사용하여 다음과 같이 推定하였다.

우선, 여러개의 시험편을 준비하여, 이들을 $\sigma_{wo} = 230$ MPa보다 約 10% 큰 255 MPa로 疲勞시험을 행하면서 $N = 5 \sim 9 \times 10^6$ 회의 범위내에서 負荷를 적당히 중단하여, 100~700 μm 범위의 多數의 疲勞豫크랙材(pre-cracked specimen)를 만들었다. 이어서, 이들 시험편을 $\sigma_{wo} = 230$ MPa 下에서 再次 疲勞시험을 행하여, σ_{wo} 下에서 얻을 수 있는 停留크랙의 限界크기를 求하였다. 얻어진 결과를 Fig. 6 中에 ○으로 나타내었다. 그림으로부터, $N = 10^7$ 회의 負荷後에도 시험편이 破斷하지 않는 最大의 豫크랙크기를 B₁材의 限界停留크랙길이 L_{c,B1}(대략 200 μm)으로 정하였다.

低炭素鋼 어닐링材의 대부분은 약 200~300 μm 의 限界停留크랙길이를 갖고 있음이 알려져 있으므로, (5,8) 上述의 실험결과는 低溫 담금질材와 어닐링材의 限界停留크랙길이가 서로 큰 差가 없음을 보여주고 있다. 그런데, 同程度의 限界停留크랙길이에 대하여 σ_{wo} 는 179 MPa에서 230 MPa로 50 MPa 정도 上昇한 것은, 低溫담금질材의 크랙 傳播抵抗이 σ_{wo} 의 上昇분만큼 증가함을 의미하는 것으로 생각될 수 있다. 이 低溫 담금질材를 室溫에서 30日間 時效시킨 B₂材는, 時效에 따른 硬度上昇을 보여주는 Fig. 3으로부터도 알 수 있듯이, $\sigma_{wo} = 253$ MPa로 더욱 큰 疲勞限度를 나타내고 있다. 이와 같이, 時效처리는 低溫 담금질材의 피로한도 上昇에 이바지하게 되는데, 時效過程이 이들 피로한도의 大小를 결정하는 크랙의 전과, 停留의 各段階에 어떠한 영향을 미치게 하는지는 現在까지 규명되지 않고 있다.

疲勞限度에 미치는 時效의 影響은 通常 時效前後의 크랙전파 거동을 各各 독립적으로 조사하여, 둘 사이의 相異를 비교하여 檢討한 경우가 많다.⁽⁹⁾ 그러나, 이러한 비교는 時效前 및 時效後 各各의 強度레벨이 서로 다른 2종류의 재료에 대하여 크랙전파 거동을 비교하는 결과가 되므로, 크랙 그 자체는 時效처리의 影響을 받지 않게 된다.

疲勞限度 向上에 미치는 本質的인 時效의 影響을 파악하기 위해서는 다음과 같은 배려가 필요하다. 즉 B₁材에 대하여, 우선 前述한 바와같이 疲勞豫크랙을 도입하고, 그後 전혀 荷重을 가하지 않고, 30日間 室溫時效 처리하여, 母相組織은 물론 豫크랙까지도 동시에 時效처리를 받은 B₂材를 만들어 내었다. 이어서, B₁材의 疲勞한도에 해당하는 230 MPa下에서 10⁷회의 疲勞負荷後에도 破斷하지 않는 豫크랙의 最大値를 실험으로 求하여, 時效前과 비교하였다.

時效처리前의 이 값은 Fig. 6에서 도시한 바와같이 L_{c,B1}≃200 μm이었다. 한편, 같은 기법을 時效처리後의 豫크랙材에도 적용하여 求한 결과 L_{c,B2}≃350 μm임을 알았다(Fig. 6의 黑丸). 또한, 同程度의 크기를 갖는 豫크랙材의 破斷壽命도 時效처리에 의하여 5~9倍 증가하였다.

이와같은 豫크랙의 크기 혹은 破斷壽命의 증가는, 분명히 時效에 의한 母相組織의 크랙傳播抵抗의 上昇을 의미한다. 그 理由로서, 室溫時效 및 반복 變形時效등에 기인한 크랙先端 組織의 強化^(6,9)가 생각되는데, 크랙 停留를 가져오는 보다 근본적

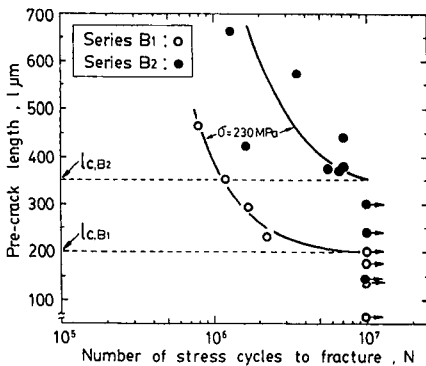


Fig. 6 Evaluation of the maximum allowable crack length(i. e., the critical non-propagating crack length) at the endurance limit employing pre-cracked specimens prepared at 10% above the original endurance limit

인 要因인 “크랙閉口(crack closure)”의 影響을 우선적으로 檢討할 필요가 있다.

3.3 室溫時效에 따르는 크랙開口變位(COD)의 변화

疲勞 豫크랙의 開口閉口거동에 미치는 時效의 影響을 검토하기 위하여, 低溫 담금질 直後의 시험편에 豫크랙을 도입하여 즉시 COD를 측정하고, 그後 30日間の 室溫時效 처리를 행한後 再次 COD를 측정하여 그 결과를 비교 檢討하였다.

上述의 時效처리 前後의 COD는 同일의 크랙에 대하여, Fig. 7의 模式圖中の ㉔점(時效前) 및 ㉕점(時效後)에서 측정하였다. 즉, B₁材에 σ_{wo} 의 直上의 應力=255 MPa를 $N=5\sim 9\times 10^6$ 회의 범위에서 負荷하여 $L=140, 300, 576 \mu m$ 의 3種의 길이를 가진 豫크랙材를 만들어, 이것들에 $\sigma=255 MPa$ 의 靜的굽힘應력을 再次 負荷하여, 無負荷時를 기준으로 한 時效前後의 COD를 求하였다. 各各의 크랙에 대하여 求한 COD변화를 Fig. 8의 (a), (b), (c)에 나타내었다.

Fig. 8로부터 時效前後의 COD는 어느 크랙의 경우에도 時效前에 비하여 0.1~0.25 μm 정도 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 $L=140 \mu m, 300 \mu m$ 의 두 크랙의 경우는, 時效前에 開口해 있던 크랙先端部가 時效後에는 閉口상태로 존재하는 特異한 사실이 인정된다.

이와같은 사실은, 時效 그 자체가 單獨으로 크랙의 開口를 억제하는 효과를 갖고 있음을 의미하고 있다. 즉, 時效는 항복應력의 상승을 수반하는 組織 그 자체의 強化뿐만 아니라, 크랙의 開口를 억제하는 효과도 구비하고 있음을 알 수 있다. 일반

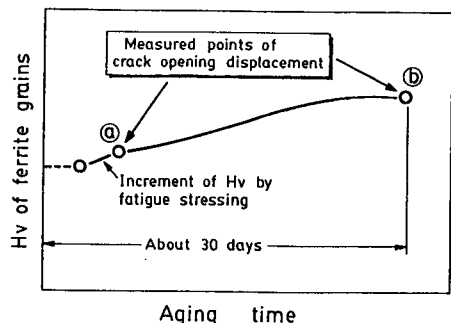


Fig. 7 Schematic diagram showing the measured point of COD

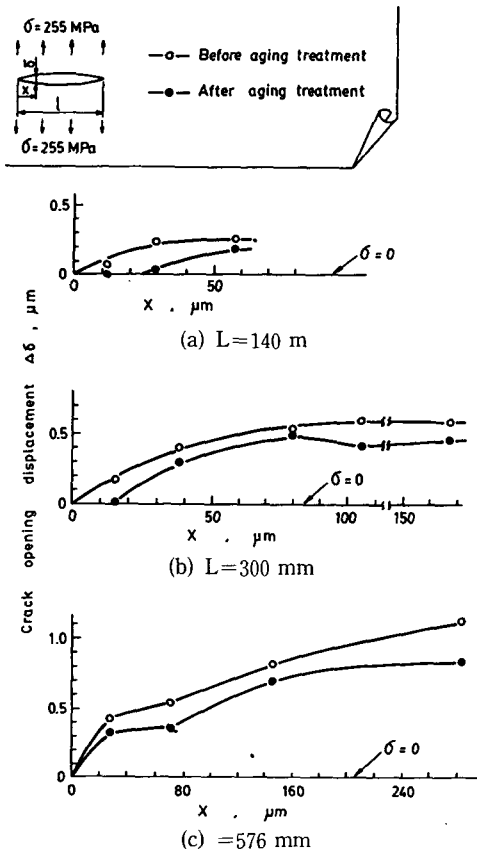


Fig. 8 Change of COD in the vicinity of crack before and after room temperature aging treatment

적으로, 크랙先端開口變位(CTOD)는 다음식으로 표시된다.⁽¹⁰⁾

$$CTOD = \beta \frac{K^2}{E\sigma_y} \quad (1)$$

여기서 β 는 비례係數이며, E 는 彈性係數, σ_y 는 항복應力이다. 따라서 本實驗의 결과는, COD와 CTOD가 서로 일정한 傾向으로 變化한다는 가정하에서, 式(1)의 결과와 잘 부합하고 있음을 보여주고 있다. 그 결과, 豫크랙의 開口에 대한 有效應力 振幅($\Delta\sigma_{eff}$)의 減少가 초래되어, 이것으로 인하여 3.2節에서 求했던 限界停留크랙의 크기 및 破斷壽命의 대폭적인 增加가 생겨났다고 判단되어 진다.

3.4 코우크싱(Coaxing)負荷에 따르는 크랙開口變位の 변화

서론에서도 언급했듯이, 코우크싱효과는 主로 變形時效에 기인하는 크랙先端部의 材質強化에 의한

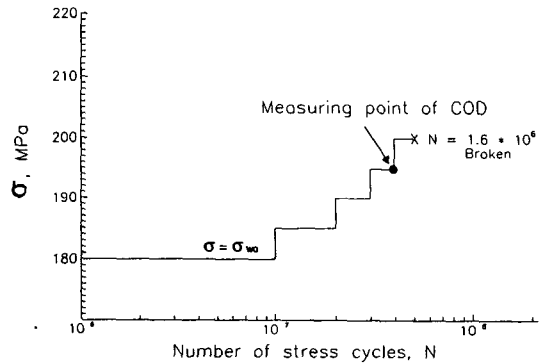


Fig. 9 Stepwise loading sequence on the fatigued specimen

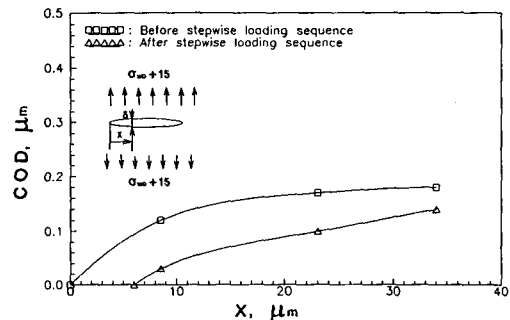


Fig. 10 Change of COD in the vicinity of crack before and after coaxing load

것으로 이해되고 있다. 室溫時效에 의한 材質強化가 궁극적으로 COD의 감소를 초래하여 피로한도의 上昇을 가져왔다는 上記의 事實로부터, 코우크싱효과도 이러한 觀點에서 검토해 볼 필요가 있다.

따라서, 어닐링材인 A材를 사용하여 피로한도下 ($\sigma_{w0} = 179$ MPa)에서 10^7 回 負荷하여, 이때 발생한 $L = 148 \mu\text{m}$ 의 停留크랙에 대하여 코우크싱효과로 인한 피로한도 上昇分으로 예상되는 15 MPa을 合한 $\sigma = \sigma_{w0} + 15$ MPa에서 COD를 3.3節에서와 同一한 요령으로 측정하고, 이 시험편을 Fig. 9에 보인 것과 같은 코우크싱 負荷를 3段階(各 段마다 5 MPa씩 增加시켜 나감) 주고난 後 再次 동일 크랙에 대하여 COD를 측정하였다. COD로 측정한 結果를 Fig. 10에 나타내었다.

그림으로부터 코우크싱 負荷前에는 명료한 開口變位를 보이던 크랙이, 코우크싱 負荷後에는 先端部가 閉口상태로 移行되고 있고, 전체적으로도 COD가 감소하고 있음을 알 수 있다. 물론 疲勞負荷中에는 프레팅 산화물(fretting oxide)이 크랙面

에 介在되어 COD를 감소시킬 수도 있으나,⁽¹¹⁾ 3.3節의 결과에 비추어 Fig. 10의 결과를 해석할때, 變形時效에 따르는 COD 감소현상이 코우크싱효과와의 重要要因으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

疲勞 豫크랙을 도입한 SM15C 低溫 담금질材에 室溫時效처리를 행하여 組織과 함께 豫크랙도 同時에 時效를 받은 시험편을 사용하여, 室溫時效가 豫크랙의 開口變位에 미치는 影響에 대하여 실험적으로 檢討하였다. 또한 SM15C 어닐링材를 使用하여 코우크싱 負荷에 따르는 크랙開口變位の 變化도 아울러 조사하였다.

그 結果, 室溫時效 및 變形時效는 豫크랙의 전파에 對하여 단순한 크랙傳播抵抗의 上昇을 가져올 뿐만 아니라, 豫크랙先端의 開口 혹은 크랙全體의 開口變位를 抑制하는 效果가 있었다. 따라서 室溫時效 및 變形時效는 이러한 要因을 通하여 疲勞限度의 上昇에 寄與하는 것임이 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 1994년도 강원대학교 기성회 연구비에 의하여 수행되었으며, 관계 제위께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," *ASTM STP* 486, pp. 230~242.
- (2) 西谷, 高尾, 1974, "1應力サイクル間における 停留き裂先端部の舉動," 日本機械學會論文集, 第40卷, 第338號, pp. 2725~2733.
- (3) 金敏健, 1991, "構造用 鋼材에 발생하는 微小 피로크랙의 停留要因," 大韓機械學會論文集, 第15卷, 第3號, pp. 880~886.
- (4) 金敏健, 山田, 國尾, 1985, "鋼の限界停留き裂寸法に及ぼす繰返し負荷履歴の影響," 日本機械學會論文集, 第51卷, 第466號, pp. 1529~1533.
- (5) 金敏健, 1988, "炭素鋼 미소 피로크랙 전파의 下限界 조건," 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第3號, pp. 505~512.
- (6) 例를 들면 西谷, 田中, 山田, 寺西, 1988, "S10C 豫ひずみ材의 코어킹싱效果と微視的き裂の關係," 日本機械學會論文集, 第54卷, 第498號, pp. 190~195.
- (7) Kunio, T., and Yamada, K., 1979, "Microstructural Aspects of the Threshold Condition for Non-propagating Fatigue Cracks in Martensitic-Ferritic Structure," *ASTM STP* 675, pp. 342~370.
- (8) 田村, 山田, 清水, 國尾, 1983, "パーライト, フェライト鋼의 耐久限度と停留き裂舉動について," 日本機械學會論文集, 第49卷, 第447號, pp. 1378~1387.
- (9) 西谷, 田中, 1980, 日本機械學會論文集, 第46卷, 第403號 pp. 266; 西谷의 2名, 1980, 材料 29-317, pp. 143; 長谷川の 3名, 1983, 材料 32-352, pp. 51.
- (10) McMeeking, R. M., 1977, "Finite Deformation Analysis of Crack-Tip Opening in Elastic-Plastic Materials and Implication for Fracture," *J. Mech, Phys. Solids*, 25, pp. 357.
- (11) Suresh, S., Zamiski, C. F. and 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) 이억섭, 김상철, 송정일, 1990, "균열정지현상에 관한 기초적 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제1호, pp. 112.
- (13) 박영근, 김정규, 김일현, 1986, "5083-O AL 합금의 피로균열진전 거동과 균열달힘에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제10권, 제2호, pp. 208.