

< 論 文 >

표면균열의 거동과 피로수명예측에 관한 연구

서창민* · 이정주** · 정은화** · 박희범***

(1988년 4월 7일 접수)

Surface Crack Behavior and the Fatigue Life Prediction of Notched Specimens

Chang-Min Suh, Jung-Ju Lee, Eun-Wha Jeong and Hee-Beom Park

Key Words : Surface Crack(표면균열), Fatigue Life Prediction(피로 수명예측), Cycle Ratio (반복수 비), Crack Growth Rate(균열성장속도), Cyclic Total Strain Intensity Factor(반복 쥘스트레인 확대계수)

Abstract

This paper deals with surface crack behavior and the fatigue life prediction of notched specimens using the relation between surface crack length, a , and the cycle ratio, N/N_f . From the $a-N/N_f$ curves, UC(the upper limit curve), LC(the lower limit curve) and MC(the middle limit curve) were assumed and utilized to predict the fatigue life and crack growth rate. The data computed from the three assumed curves were compared with the experimental data. It has been found that in the stable crack growth region ($N/N_f=0.3-0.8$) fatigue life can be predicted within 20% errors. Using the characteristics of $a-N/N_f$ curve, it is possible to predict the $da/dN-K_{max}$ curve, the $da/dN-\Delta K_{\epsilon}$ curve, and the $S-N_f$ curve.

1. 서 론

각종 기계 및 구조물이 疲勞限度 이상의 反復荷重을 받으면 그 表面에 存在 가능한 작은 表面缺陷에서 表面疲勞균열이 發生·成長하여 疲勞破壞가 되는 경우가 많다.

그러나 破壞力學의 發達과 더불어 널리 취급되어 왔던 表面균열의 疲勞균열성장거동에 관한 자료는 상당히 많이 축적되어 있지만 實用上 중요한 表面균열(surface crack)에 관한 자료는 대단히 부족한 실정이다^(1~11).

특히 최근 피로수명예측의 중요성이 인식되어 表面균열에 관해서는 여러방법의 수명예측방법이

시도되었다^(1,2,11).

그러나 表面균열에 관한 연구 보고는 적고 찾아 보기 어려운 실정이다.

앞서의 일련의 연구^(7~10)에서 여러재료의 피로시험의 결과중 表面균열의 길이 a 를 수명비 N/N_f 로 정리하면 재료의 차이와 應力差에도 불구하고 여러 실험자료가 비교적 좁은 벤드내에서 모이는 特性을 알았다.

따라서 본 연구에서는 이 좁은 벤드내에 자료가 모이는 피로균열의 特性을 利用하여 表面피로균열의 성장거동을 파괴역학적으로 해석, 연구하여 균열의 성장특성과 $S-N_f$ 곡선의 추정을 마이크로 컴퓨터로 계산하였다.

2. 實驗方法

본 연구에 사용된 실험 자료는 高炭素鋼(J재),

*정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과

**정회원, 한국과학기술대학 생산공학부

***현대자동차 연구소

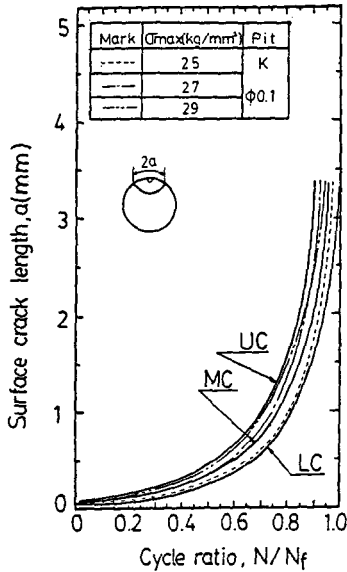


Fig. 1 Relation between surface crack length and the cycle ratio for medium carbon steel

中炭素鋼(K材) 및 軟鋼(G, H材)材의 것이며, 상온에서 회전굽힘 피로시험의 결과에서 얻었다. 표면균열의 길이는 일정 회전수마다 시험기를 정지시

켜 표면레프리카를 채취하여 광학 현미경으로 측정하였다. 또한 주스트레인範圍(total strain range) $\Delta\epsilon_t$ 는 시험편의 균열측정부의 반대편의 평활부中央에 小型의 저항식 스트레인 게이지를 부착시켜 파단수명의 5~10%마다 시험기를 정지시켜, 스트레인 측정기로 測定하였다.

Fig. 1은 작은 表面缺陷(직경 0.1mm, 깊이 0.1mm)을 가진 中炭素鋼 K材의 실험결과에서 얻은 피로균열길이 a 와 반복수비 N/N_f 의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림상에는 컴퓨터로 계산할 최외곽선인 上限을 나타내는 UC(upper limit curve)와 下限線인 LC(lower limit curve) 및 中央線인 MC(middle limit curve)를 각각 나타낸다.

Fig. 2는 高炭素鋼材(직경 0.5mm, 깊이 0.5mm)인 표면결합재로 열처리 방법에 따라 노냉된 J_1 과 유냉된 J_2 로 분류함)와 중탄소강재에서 얻은 $a-N/N_f$ 의 관계를 동시에 나타내고 있으며, 材質의 차이와 應力레벨의 차이에도 불구하고 $a-N/N_f$ 곡선은 비교적 좁은 밴드내에 여러 자료들이 모임을 알 수 있다.

3. 계산방법

본 연구에서는 Fig. 1 및 Fig. 2에서 나타낸 것과 같은 $a-N/N_f$ 의 成長特性으로부터 아래와 같은 방법으로 균열성장속도 da/dN 와 최대응력확대계수 K_{max} 의 관계를 계산하고, 또 $S-N_f$ 곡선을 推定하여 實驗데이터와 비교, 검토하였다.

(1) 표면결합의 직경과 깊이가 같은 경우에는 Fig. 1과 같은 세 응력레벨의 원활한 곡선을 포함하는 세가지 곡선 즉 UC, LC 및 MC로 가정하며, Fig. 2와 같은 세가지 형태인 시험자료는 각각의 자료에서 세곡선을 가정한다.

(2) 세가지 곡선이 정하여 지면, 반복수비에 따른 각 곡선의 길이를 계산할 필요가 있다. 그러나 Figs. 1과 2의 플롯트 방법으로는 계산이 복잡하므로, Fig. 3과 같이 그림의 플롯트 방법을 변경하였다.

(3) 따라서 Fig. 1과 Fig. 2를 $\log a-N/N_f$ 곡선으로 나타내면 Fig. 3(a) 및 Fig. 3(b)와 같이 全壽命比를 거의 直線化시킬 수 있었다. 그러나 直線이 되지 않는 區間은 계산의 편의상 $N/N_f = 0.3 \sim 0.8, 0.05 \sim 0.9, 0.3 \sim 0.9, 0.05 \sim 0.8$ 인 네 구간으로 구분해서 수명을 추정 비교하였다. 이때

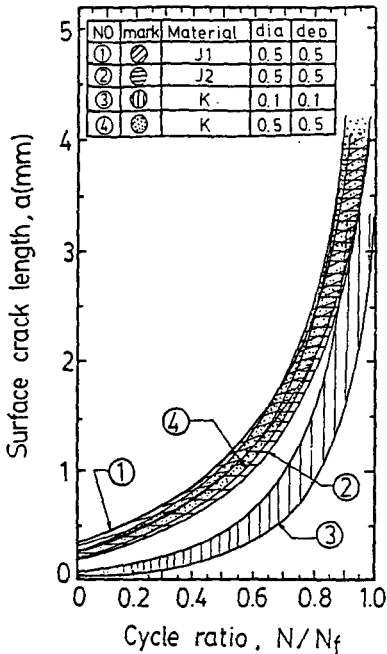


Fig. 2 Relation between surface crack length and the cycle ratio

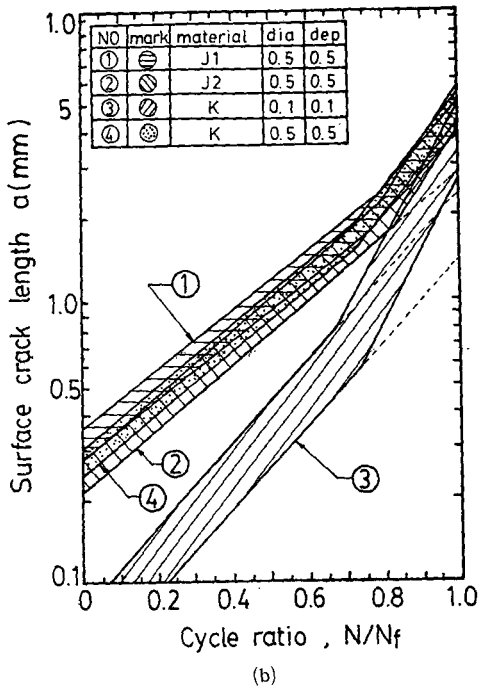
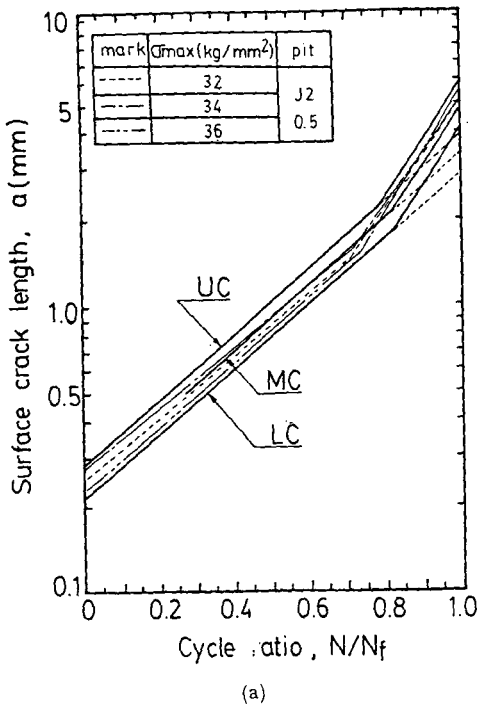


Fig. 3 Relation between the surface crack length and the cycle ratio

Fig. 3상의 절선이 생긴 부분은 불안정한 균열성장의 영역이므로 이를 편의상 直線으로 연장시켜 계산하였다.

(4) Fig. 3의 壽命比 N/N_f 를 등간격으로 20等分하여 각 등분점에 대한 a 를 上記의 방법에 대하여 구하였다. 이 a 값과 시험편의 파단수명 N_f 값을 마이크로 컴퓨터에 入力시켜 계산하여 소기의 결과를 구하였다.

4. 계산결과 및 고찰

4.1 $da/dN - K_{max}$ 곡선의 추정

Fig. 4는 Fig. 1과 같은 $a - N/N_f$ 곡선에서 假定

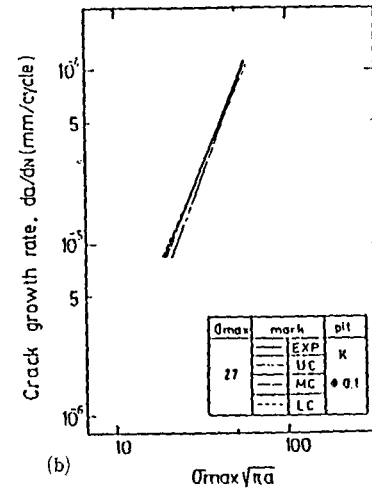
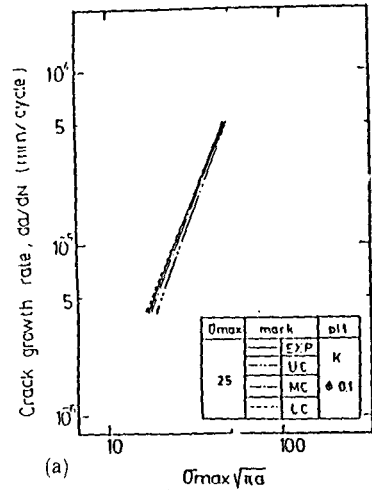


Fig. 4 Dependence of the growth rate of small surface cracks upon the maximum stress intensity factor

된 세곡선을 이용하여 계산한 예를 나타내었다. 그림상의 실선은 實驗結果이며, 세가지 종류의 점선으로 나타낸 직선은 上記에서 가정한 UC, LC 및 MC를 利用하여 계산한 것이다. Fig. 4와 같이 본 계산방법으로 推定 計算된 자료는 각 응력레벨에 따라 비교적 실험결과와 잘 일치 됨을 알 수 있다.

이와같은 방법으로 계산된 UC, LC 및 MC의 곡선을 중탄소강 K材와 高炭素鋼 J材에 적용시켜 $da/dN - K_{max}$ 과의 관계를 동시에 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그림에서 각 자료는 일정한 범위내에 정리되며, 더욱이 直線으로 플롯됨을 알 수 있다. 단 Fig. 4, Fig. 5의 자료는 균열의 安定成長領域인 수명의 30~80%구간의 자료만을 나타내고 있다. 30%以前의 區間은 表面欠陷의 형상에 의한 영향으로 直線化가 不可能하므로 제외시켰으며, 80%以後에는 不安定成長領域으로 또한 제외시켰다.

4.2 $da/dN - \Delta K \epsilon_t$ 의 推定

Fig. 5를 보면, 各 材料의 表面欠陷의 영향과 應力依存性, 그리고 재질의 영향이 다소 존재함을 알 수 있다. 이러한 영향을 줄이기 위하여 σ_{max} 항 대신에 反復 全스트레인 범위(cyclic total strain

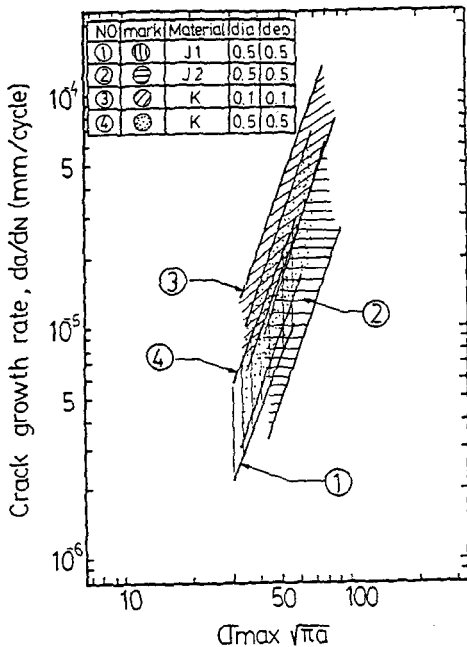


Fig. 5 Dependence of the growth rate of small fatigue surface crack upon the stress intensity factor

range) $\Delta \epsilon_t$ 를 사용한 반복 全스트레인 확대계수범위 $\Delta K \epsilon_t$ 를 사용하면 應力依存性이 없어지고 하나의 직선으로 統一的인 정리가 가능함이 보고(4,8,9)되고 있다.

따라서 Figs. 6, 7은 $\Delta K \epsilon_t$ 를 사용하여 $da/dN - \Delta K \epsilon_t$ 를 컴퓨터로 추정된 결과를 나타내고 있다. Fig. 5에서 생긴 재료의 차, 應力依存性 및 表面欠陷의 영향이 Fig. 7에서는 거의 없어지고 균열성장속도 da/dN 을 統一的으로 整理 可能함을 알 수 있다.

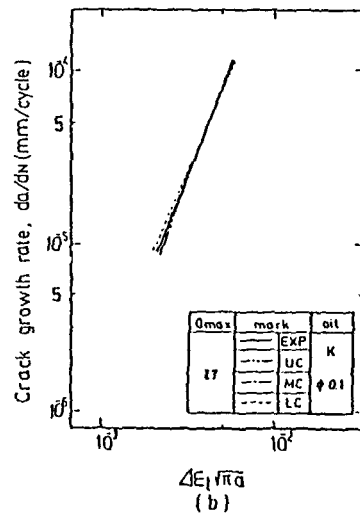
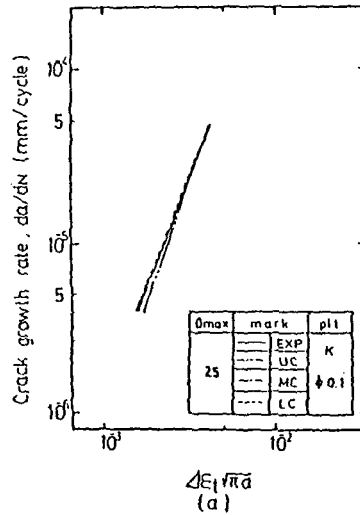


Fig. 6 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon the cyclic strain intensity factor range

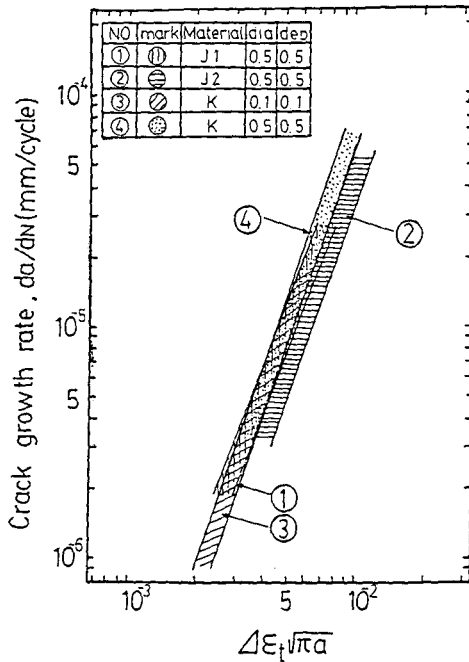


Fig. 7 Prediction fatigue life from assumed three curves UC, MC and LC.

4.3 S-N_f곡선의 推定

본 연구에서는 아래와 같은 식 (1)을 사용하여 세 가지 탄소강재의 각 응력레벨에 대하여 疲勞壽命을 推定 比較하였다. 또 수명비를 Table 1에 나타낸 것과 같이 다섯구간으로 나누어 각 구간의 피로수

명을 추정하여 어떤 구간의 유효성이 좋은지 비교하여 보았다.

먼저 식 (1)에서 반복수 N 을 구하면 $m \neq 2$ 인 경우 식 (2)와 같이 된다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K \epsilon_t)^m \quad (1)$$

$$\Delta K \epsilon_t = \Delta \epsilon_t \sqrt{\pi a}$$

단, $\Delta \epsilon_t$: 안정된 쏘스트레인범위

$$N = \frac{a^{(-m/2+1)} - a_i^{(-m/2+1)}}{\left(-\frac{m}{2}+1\right)C(\Delta \epsilon_t)^m \pi^{\frac{m}{2}}} \quad (2)$$

단, a_i : 초기균열의 길이

여기서 m 과 C 는 최소자승법으로 구하였으며 수정계수는 1로 가정하였다. 또 식 (2)에서 균열길이 a 는 재료의 파괴인성치 K_{Ic} 또는 미리 알려진 허용 한계균열길이 a_f 로 정하였다. 그리고 壽命比는 Table 1과 같은 균열의 성장곡선을 4구간(Fig. 3상의 0.8이후 절선이 되는 부분을 직선으로 연장 가정함)으로 계산하였다.

Fig. 8은 UC, LC 및 MC 곡선을 前述한 다섯구간에 대하여 推定한 壽命 예측치 가운데 MC에 관한 결과와 실험에서 구한 S-N_f곡선을 나타낸다. 각 구간에서 피로수명을 추정해 본 결과 σ_{max} 이나 $\Delta \epsilon_t$ 의 결과가 거의 일치하였으므로 Fig. 8에는 $\Delta \epsilon_t$ 를 이용한 결과만을 나타내고 있다. 이 가운데 ③으로 표시된 점선부는 상술한 바와 같이 $\log a - N/N_f$ 곡선에서 기울기가 변하지 않는 하나의 직선(Fig. 3(b)상의 점선부)으로 가정하여 추정된

Table 1 Distribution parameters of UC, MC and LC

Curve	Interval	Value	Exp.	Interval			
				0.3-0.8	0.3-0.8 (Log)	0.05-0.9	0.3-0.9
UC	Mean Value m_r	1	1.082	1.008	0.944	1.114	0.965
	Stand. devi. S	0	0.0668	0.0937	0.0718	0.0745	0.0785
	Coeff. Vari. C.V (%)	0	6.17	9.29	7.61	6.68	8.13
MC	Mean Value m_r	1	0.999	0.948	0.925	1.015	0.946
	Stand. devi. S	0	0.0429	0.0786	0.0522	0.056	0.0577
	Coeff. vari. C. V (%)	0	4.29	8.29	5.64	5.53	6.09
LC	Mean Value m_r	1	0.933	0.910	0.905	0.931	0.917
	Stand. devi. S	0	0.0585	0.06	0.0436	0.0536	0.0533
	Coeff. Vari. C. V (%)	0	6.27	6.60	4.81	5.76	5.81

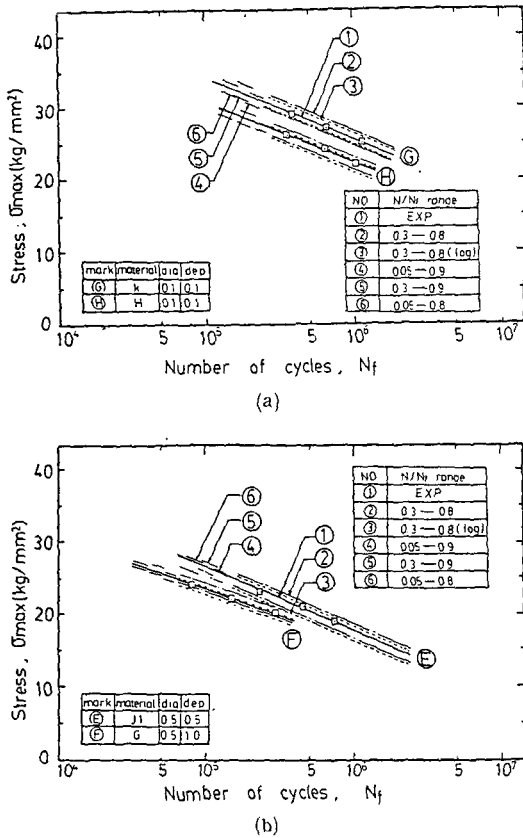


Fig. 8 Prediction of fatigue life from the three assumed curves UC, MC and LC.

$S-N_f$ 곡선이다. 이 값은 실험치보다 약 6% 정도의 낮은 값을 나타내고 있다. 그리고 a_f 값은 피로 수명에 큰 영향을 미치지 않으나, 초기균열크기인 a_i 값은 큰 영향을 미침을 알았다.

Table 1은 다섯가지 수명비 구간으로 분리, 계산된 Fig. 8의 수명추정결과의 실험치에 대한 상대적인 평균치 m_r , 표준편차 S 및 변동계수 $C.V$ 를 나타내고 있다.

Table 1과 같이 $S-N_f$ 곡선의 수명추정 결과는 수명비 0.3~0.8구간의 계산결과가 실험치와 비교적 잘 일치하였으며 전반적으로 약 20% 오차범위 내에 계산결과들을 정리가능하였다. Table 1중에서 MC의 0.3~0.8구간값이 가장 오차가 적고 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 수명비 0.3~0.9구간도 이에 상응하는 값을 나타냈으나 0.05~0.8, 0.05~0.9구간은 0.3~0.8구간 보다 오차가 크며 계산의 오차가 큼을 알 수 있다.

5. 結 論

本 研究에서는 高炭素鋼材, 中炭素鋼材 및 低炭素鋼材에 작은 表面欠陷을 加工한 試驗片을 사용하여 回轉굽힘疲勞試驗을 실시하여 얻은 실험결과와 共通의인 結果인 $a-N_f$ 특성을 이용하여 마이크로 컴퓨터로 균열의 성장속도와 $S-N_f$ 곡선의 推定을 시도하였다. 즉 좁은 밴드의 두 외곽곡선과 중앙을 지나는 UC, LC 및 MC의 세곡선을 假定하여 疲勞壽命을 추정한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 수명비의 다섯區間中 疲勞균열의 安定된 성장 구간인 $N/N_f=0.3\sim 0.8$ 에서 실험치와 계산치가 약 20%이내의 오차로 $S-N_f$ 곡선이 추정가능하였다.
- (2) 材料와 表面欠陷의 크기가 다른 경우에는 欠陷의 직경이 같으면 $a-N_f$ 곡선상의 가정된 밴드로 피로수명을 추정하여도 약 30%以內의 오차내에 推定可能하였다.
- (3) 이상과 같이 $a-N_f$ 곡선의 특성을 利用하여 계산하면 $da/dN-K_{max}$ 곡선, $da/dN-\Delta K\epsilon_i$ 곡선 및 $S-N_f$ 곡선의 推定이 可能하였다.

참 고 문 헌

- (1) Hudak, S. J. Jr, 1981, "Small Crack Behavior and the Prediction of Fatigue Life", Trans. of ASME, J. of Eng. Materials and Technology, Vol. 103, pp. 26~34.
- (2) EL Haddad, M.H., and Topper, T. H., 1981, "Fatigue Life Prediction of Smooth and Notched Specimens Based on Fracture Mechanics", Trans. of ASME, J. of Eng. Materials and Technology, Vol. 103, pp. 91~96.
- (3) Wood, H. A., 1976, "Application of Fracture Mechanics to Aircraft Structure Safety", Eng. Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 557~564.
- (4) Kitagawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M. and Miyashita, S., 1979, "Quantitative Analysis of Fatigue Process—Microcracks and Slip Lines under Cyclic Strain", ASTM STP 675, pp. 420~449.
- (5) EL Haddad, M.H., Smith, K.N. and Topper, T.H., 1979, "Fatigue Crack Propagation of Short Cracks", Trans. of ASME, J. of Eng. Materials and Technology, Vol. 101, pp. 42~47.

- (6) 西谷弘信, 森光武則, 1976, 小穴付き裂試験片の回轉曲げ試験によるき裂伝ば特性の評價”, 日本機械學會論文集, Vol. 42, pp. 325~333.
- (7) 北川英夫, 結城良治, 高橋進, 徐昌敏, 1979, “平滑表面に發生・成長する微小疲勞き裂の破壊力學的研究”, 日本機械學會講演論文集, No. 790-9, pp. 25~30.
- (8) 北川英夫, 徐昌敏, 1980, “小さな人工缺陷からの疲勞き裂成長挙動, 日本材料學會 第14會 疲勞シンポジウム前刷集, pp. 26~30.
- (9) 徐昌敏, 姜用求, 1984, “炭素鋼材의 작은 표면 결함에서 成長하는 표면피로균열의 成長特性에 관한 연구”, 대한조선학회지, 제21권, pp. 35~42.
- (10) 徐昌敏, 權五憲, 李正州, 1987, “작은 表面欠陷에서 發生・成長하는 表面疲勞균열의 成長特性에 관한 研究”, 대한기계학회논문집, 제11권, 제2호, pp. 191~197.
- (11) Chaboche, J.L., 1982, “Lifetime Predictions and Cumulative Damage under High-Temperature Conditions”, ASTM STP 770, pp. 81~104.