

◎ 論 文

2¹/₄ Cr-1 Mo강의 평활재상의 미소한 표면피로균열의 성장특성

徐 昌 敏* · 禹 炳 哲** · 張 喜 洛***

(1990년 12월 10일 접수)

Propagation Characteristics of Fatigue Microcracks on Smooth Specimen of 2¹/₄ Cr-1 Mo Steel

Chang-Min Suh*, Byung-Chul Woo** and Hee-Rak Jang***

Key Words : Surface Fatigue Crack(표면피로균열), Major Crack(주균열), Crack Growth Rate(균열성장속도), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Crack Depth(균열깊이), Cycle Ratio(반복수비)

Abstract

In this paper, fatigue tests were carried out at stress test levels of 461 MPa, 441 MPa, and 431 MPa by using smooth specimen of 2¹/₄ Cr-1 Mo steel with the stress ratio(R) of 0.05. The initiation, growth and coalescence process of the major cracks and sub-cracks among the fatigue cracks on the smooth specimen are investigated and measured under each stress level at a constant cycle ratio by the replica technique with optical microscope. Some of the important results are as follows :

In spite of the difference of stress levels, the major crack data gather into a small band in the curve of surface crack length and crack depth against cycle ratio N/N_f. The sub-crack data, however, deviate from the band of the major crack.

The growth rates, da/dN, of major and sub-crack plotted against the stress intensity factor range, ΔK, have the tendency to be compressed on a relatively small band. But it is more effective to predict fatigue life through major cracks.

The propagation behavior of surface microcracks on the smooth specimens coincides with that of the specimen having an artificial small surface defect or through crack.

+ 1990년 대한기계학회 춘계학술대회 발표

* 정희원 경북대학교 공대 기계공학과

** 경북대학교 대학원

*** 경북대학교 산업대학원 기계공학과

구하여 파괴역학적으로 해석하였다.

1. 緒 論

대부분의 구조물 및 기기의 부재에는 표면 또는 내부에 결함이 존재 가능하다. 특히 재료의 용접에 의한 연결부, 부식에 의한 부식공(pit) 및 가공중에 생긴 흠집과 같은 결함에는 응력집중현상이 생겨서 부재의 항복강도보다 훨씬 낮은 응력레벨의 반복 작용으로 인해 피로균열이 발생, 성장하여 피로파괴를 일으키는 경우가 많다. 이러한 피로파괴는 인명피해와 경제적 손실과 수반되므로 이것을 방지하기 위한 사회적인 욕구가 증대되고 있다.

따라서 해석적인 배경이 확립된 파괴역학적 개념에 의한 구조물 및 기기의 설계 검사 및 안전성 평가가 피로파괴를 방지하기 위한 중요한 해석수단으로 부각되었다. 또한 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 최근까지는 관통대균열에 관한 연구가 수행되어 비교적 많은 자료가 축적되어 왔다.

그러나 실구조물 및 기기의 중요한 파괴원인인 미소표면균열에 대한 연구는 실험, 기술상 및 해석상의 곤란 때문에 상당히 부족한 형편이다. 따라서 최근 미소한 표면균열에 의한 피로균열의 발생 성장문제는 공학적 및 공업적인 연구의 필요성이 증대되므로 파괴역학적인 측면에서 중요한 연구의 대상이 되고 있다.

이에 관한 연구중에는 北川^{1,2)}, 徐^{3,4)} 및 Miller^{5,6)}의 연구를 예로 들수 있고, 피로파괴에 있어 미소한 표면균열의 성장특성을 연구 해석하였다. 즉 작은 표면균열의 성장특성을 선형 탄성 파괴역학(linear elastic fracture mechanics : LEFM)의 개념에 의한 파괴역학적인 해석방법의 확장 응용에 관한 연구가 많이 시도되고 있다.

본 연구에서는 공학적 및 공업적으로 그 연구의 중요성이 인정되는 미소한 표면 피로균열의 성장 거동을 조사하기 위하여 2¹/₄ Cr-1 Mo 고압용기강 재료의 모래시계형인 평활시험편으로 인장축하중 피로시험(R=0.05)을 실시하였다. 즉 평활시험편상의 표면 및 깊이 방향으로 발생, 성장하는 미소표면균열의 성장거동을 레프리카법과 광학사진법을 응용하여 평활시험편의 피로수명을 좌우하는 주균열과 보조균열의 거동을 실험적으로 조사 연

2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험편 재료는 고압력용기강 재료 널리 사용되는 2¹/₄ Cr-1 Mo(A387) 강이며 그 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. 시험편은 2¹/₄ Cr-1 Mo강 厚板에서 균열성장방향이 압연방향과 일치하도록 절단 채취하였으며 그 형상과 크기는 Fig. 1과 같다. 즉 모래시계형 형상으로 기계가공한후 에머리 페이퍼 1, 200번까지 가볍게 연마, 버핑하고, 아세트산(acetic acid)와 산화크롬으로 된 전해 연마액을 사용하여 시험편의 표면을 전해 연마하였다.

Table 1 Chemical composition of 2¹/₄ Cr-1 Mo steel(A387)

(wt. %)							
C	Mn	Mo	Ni	Cr	Si	P	S
0.15	0.42	0.95	0.10	2.24	0.30	0.006	0.003

Table 2 Mechanical properties of 2¹/₄ Cr-1 Mo steel

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{ut} (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area(%)
435	508	27	70

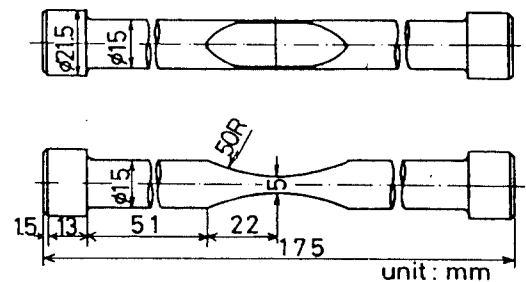


Fig. 1 Configuration of the specimen

피로시험은 전기유압식 피로시험기(MTS, 10 ton)를 사용하였고 대기중에서 응력비 R=0.05의 하중제어 피로시험을 실시하였다. 이때 하중파형은 주파수 10 Hz의 정현파를 사용하였다.

표면균열길이 2a는 일정반복수(N_f 의 5-7 %)마

다 시험기를 일시 정지시켜 레프리카를 채취 보관하고 광학현미경을 사용, 레프리카를 확대하여 고정밀도로 측정하였다. 또 표면결함의 깊이 b 및 균열면 형상은 비치마크(beach mark)법과 템퍼칼러(temper color)법을 사용하여 표면균열길이 $2a$ 를 개입시켜 깊이 b 를 결정하는 방법을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응력-하중반복수 곡선

Fig. 2에는 평활재의 인장축하중 피로시험($R=0.05$)에서 얻은 응력-파단반복수($S-N$)곡선을 공칭응력의 최대응력 σ_{max} 에 대하여 임의의 반복수 N 과 파단반복수 N_f 로 나타내었다. 또한 미소한 표면균열의 발생시기와 성장거동을 조사하기 위하여 Fig. 2상에는 $S-N_f$ 곡선상에 나타난 세가지 응력레벨 즉 $\sigma_{max}=461, 441, 431$ MPa에 한하여 표면균열 길이의 절반 a 가 어떤 일정치로 되는 반복수 N 을 연결한 등균열길이(equi-crack length)직선을 병기하였다.

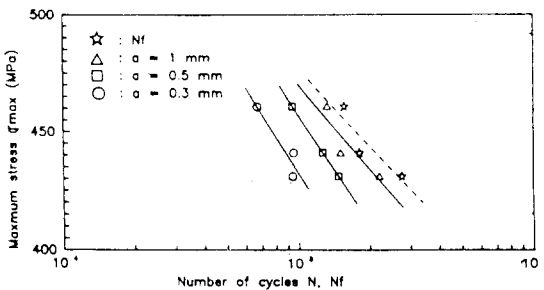


Fig. 2 Fatigue life data with specified equi-crack length for 2 1/4 Cr-1 Mo steel at a stress ratio $R=0.05$

본 연구에서 시험편의 피로수명을 좌우하는 시험편상의 한 개의 중요한 피로균열을 주균열(major crack)이라고 칭하고 그외의 표면균열을 보조균열(sub-crack)이라고 하였다. 즉 Fig. 2상에는 주균열의 표면균열길이가 어떤 일정치로 되는 반복수 N (즉 $a=0.3mm$ (\circ 로 표시), $0.5mm$ (\square) 그리고 $1.0mm$ (\triangle))을 연결한 등균열길이 직선과 파단반복

수 N_f (\star)를 동시에 표시한 것이다. 이 등균열길이 직선을 나타내는 세가지의 $S-N$ 직선은 $S-N_f$ 직선과 거의 평행한 경향이 있고 이때의 N 와 N_f 간의 비는 응력레벨에 큰 영향없이 거의 일정한 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 연강재^{3,7)} 스테인리스강재의 결과⁴⁾와도 잘 일치하였다. 이러한 등균열길이 직선의 평행성은 파괴역학적인 피로수명의 예측과 검사에도 유용하다.

3.2 피로균열의 발생 및 성장거동

Fig. 2상의 $S-N_f$ 곡선상의 피로균열의 발생 및 성장거동을 조사하여 Fig. 3(a), (b), (c)에 나타내었다. 즉 Fig. 3(a)상에는 주균열의 표면균열길이 $2a$ 의 절반인 a 와 반복수 N 와의 성장특성을 나타내었다. $a-N$ 곡선은 각응력레벨에 따라 각각 $\circ, \square, \triangle$ 로 표시하였다.

Fig. 3(b)는 보조균열의 $a-N$ 곡선의 특성을 나타내며 Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)를 동시에 나타내고 있다. 이러한 그림에서 보면 평활표면상에서의 발생, 성장하는 주균열의 발생시기는 Fig. 3(a)와 같이 피로수명의 약 10% 이전에 발생하여 반복수의 증가와 더불어 서서히 증가하며 피로수명의 후기에서는 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 3(b)상의 보조균열(sub-crack)과 주균열의 성장거동을 서로 비교하여 볼때 보조균열의 길이는 파

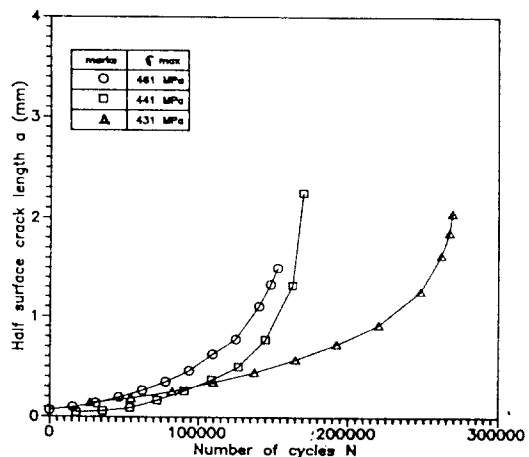


Fig. 3(a) Growth behavior of major crack initiated from smooth specimen

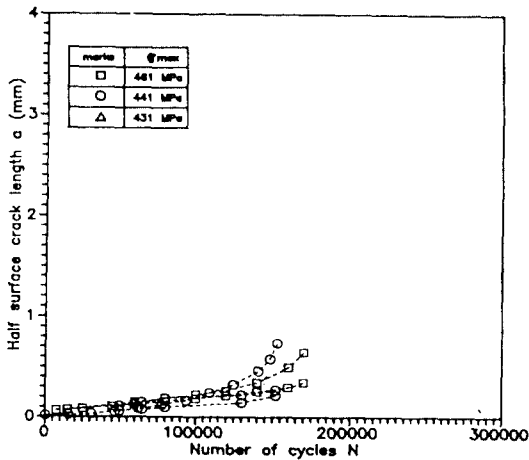


Fig. 3(b) Growth behavior of sub-crack initiated from smooth specimen

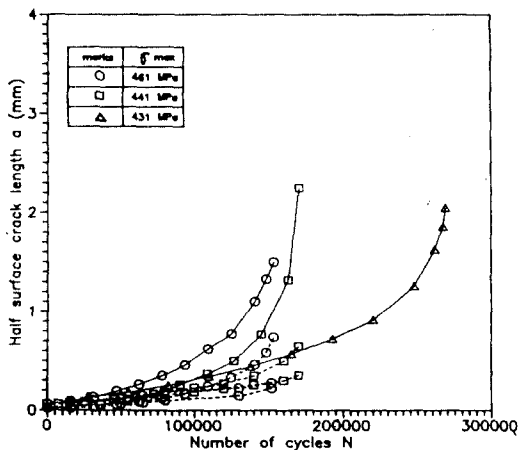


Fig. 4(c) Growth behavior of major crack and sub-crack initiated from smooth specimen

단수명일때도 그 길이가 1mm이하이며 그 영향이 주균열보다 적음을 알 수 있다. 보통 연강의 경우에는 피로한도이상의 응력레벨하에서는 수 많은 표면균열이 발생하였지만^{1,3)} 본 연구에 사용된 고압용기강재는 304스테인리스강⁴⁾처럼 소수의 표면 균열만이 발생, 성장함에 의하여 시험편의 피로수명을 좌우시켰다.

Fig. 4(a), (b), (c)는 각각 표면길이의 절반인 a와 반복수비 N/N_f와의 관계를 나타내었다. 이 압력용

기강재에서 발생, 성장하는 미소 피로균열의 주균열은 Fig. 4(a)와 같이 a-N/N_f선도상에서 세가지 응력레벨의 자료가 비교적 좁은 분산밴드내에 데이터가 모이는 특성을 알 수 있고 반복수비의 증가에 따라 원활하게 성장함을 알 수 있다. 이와같은 성장특성은 304 스테인리스강재⁴⁾, S15C재³⁾의 결과와도 일치하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4(b)는 Fig. 3(b)의 보조균열(sub-crack)에 관한 a-N곡선을 a-N/N_f곡선으로 나타낸 것이다. 또한 Fig. 4(c)는 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 동시에 나타낸 것으로 보조균열은 주균열보다 시험편의 피로수명에 미치는 영향이 미약함을 알 수 있다. 또한 주균열보다 그 성장거동이 미약한 보조균열들은 a-N/N_f선도상에서 나타낸 점선의 좁은 밴드의로 벗어남을 알 수 있다.

Photo 1상에는 위에서 설명한 주균열과 보조균열의 관찰 일례를 나타낸 것이다. 즉 431MPa 일 정응력레벨하의 표면상에서 존재 가능한 미소한 개재물(介在物)에서 발생, 성장하는 F1이라고 표시

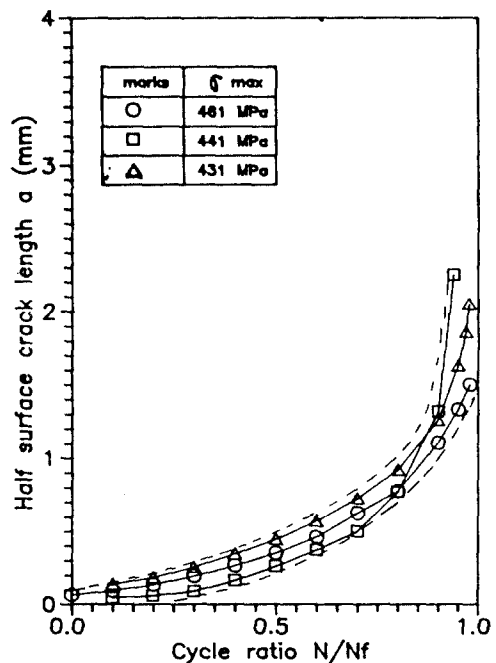


Fig. 4(a) Variation of surface length of crack as a function of cycle ratio

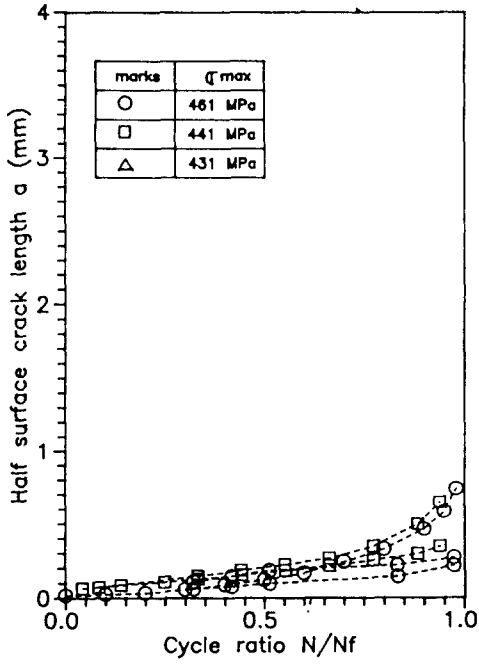


Fig. 4(b) Variation of surface length of sub - crack as a function of cycle ratio

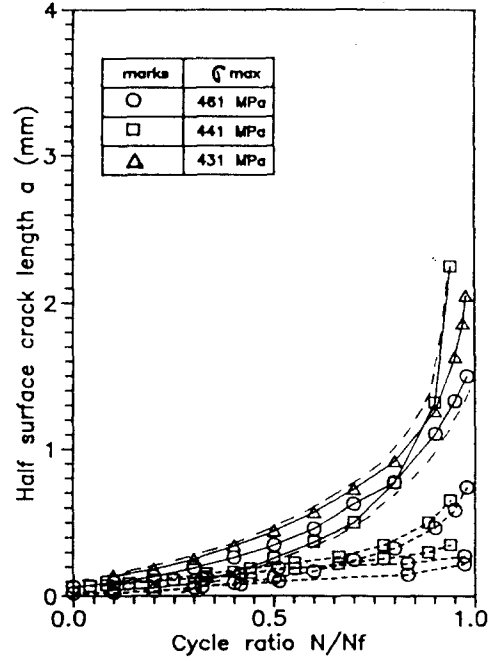
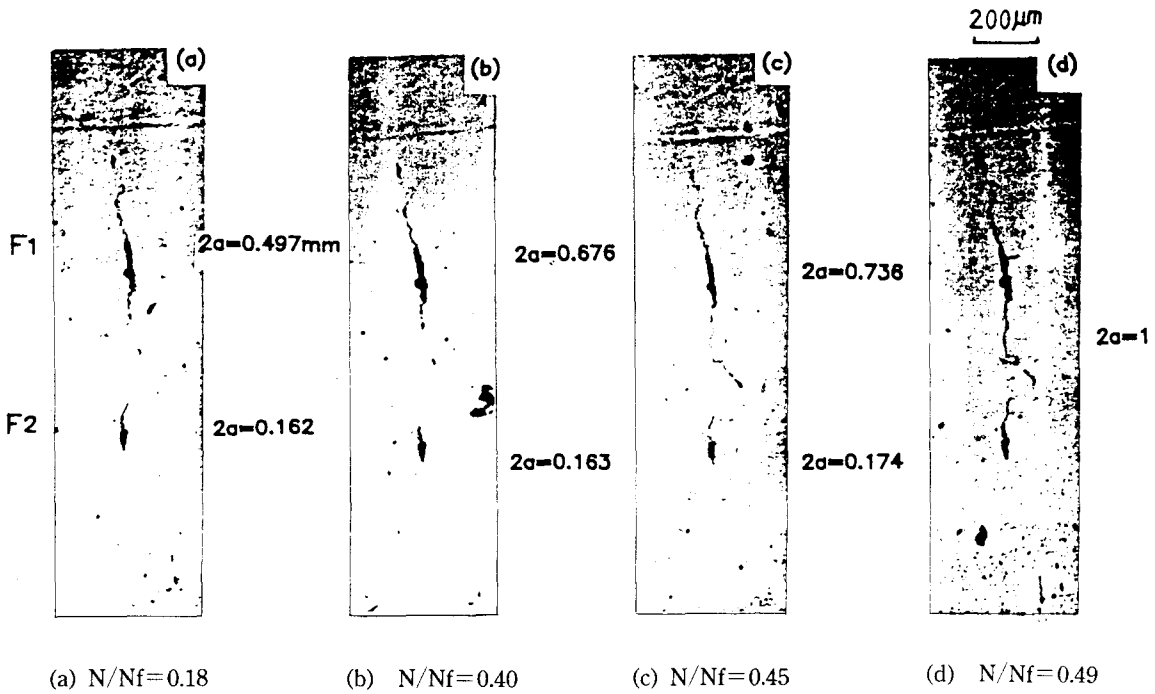
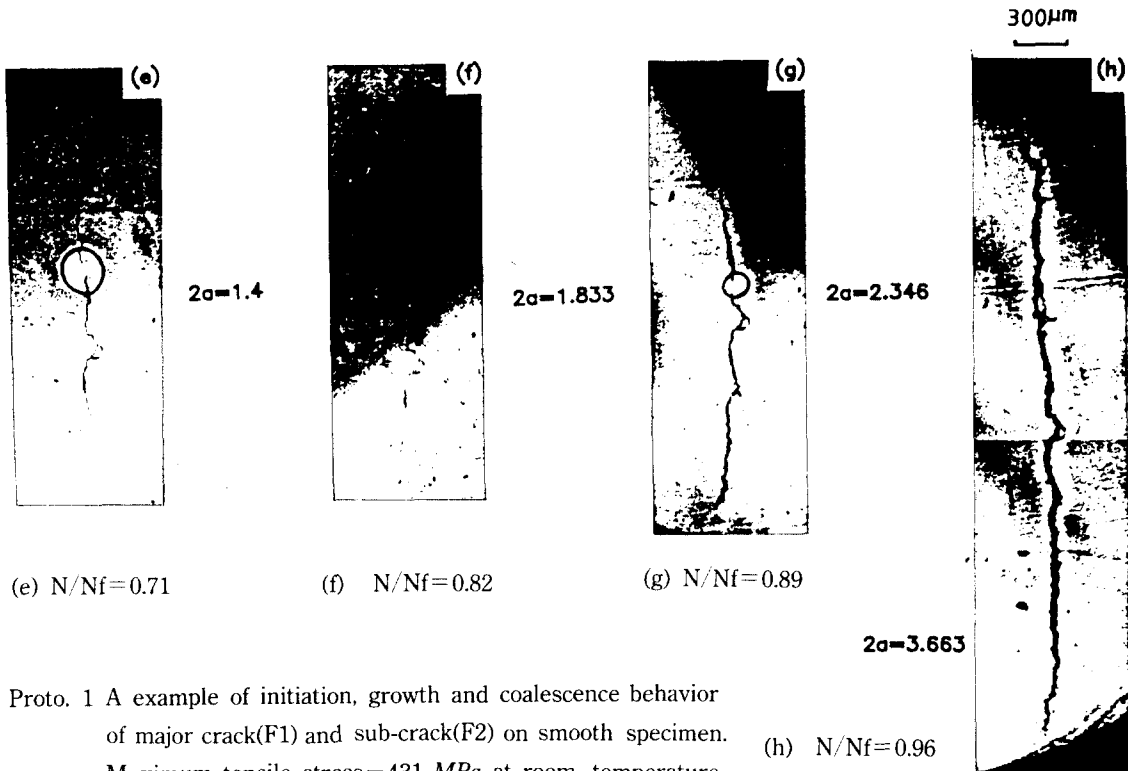


Fig. 4(c) Variation of surface length of major crack and sub - crack as a function of cycle ratio

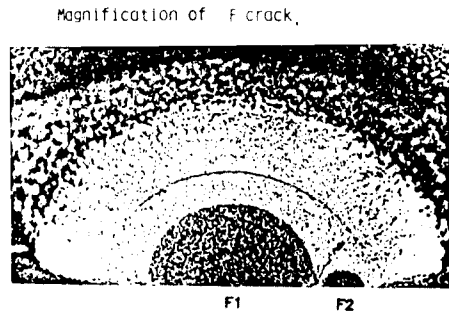




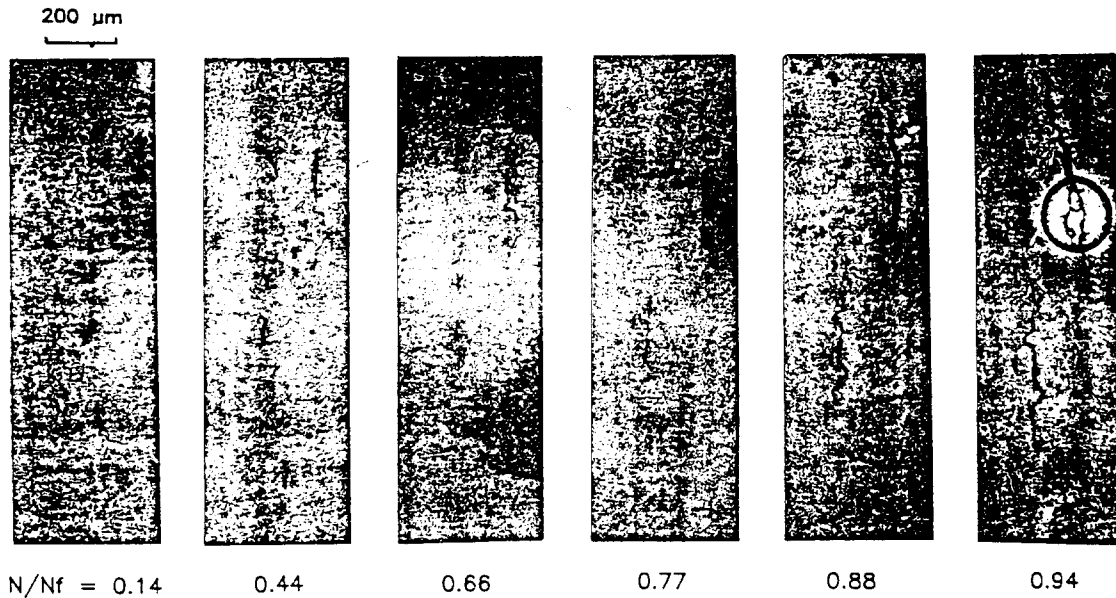
Proto. 1 A example of initiation, growth and coalescence behavior of major crack(F1) and sub-crack(F2) on smooth specimen. Maximum tensile stress=431 MPa at room temperature. Number of cycles to fracture, Nf=2.75×10⁵

된 주균열의 발생, 성장거동을 예시한 것이다. 또 이 사진상에는 F1 주균열선단에 F2라는 sub-crack도 발생하여 서로 성장하다가 피로수명의 약 49%인 Photo 1(d)에서 F1과 F2가 합체되어 한 개의 F균열로 성장함을 관찰할 수 있다. 즉 주균열인 F1은 개재물로부터 상하로 비슷한 크기로 성장하였지만 보조균열 F2는 Photo 1(d)와 같이 F1쪽으로만 성장하다가 두개가 합체됨을 알 수 있다. 이와같은 현상은 주균열에 의한 영향으로 응력확대계수 K가 F1쪽으로 크다고 보고되고 있다.¹⁵⁾ 이러한 관계는 Photo 2상의 파단면상의 확대사진에서 관찰할 수 있다. 또한 Photo 3은 441MPa의 응력레벨하에서 관찰된 보조균열의 발생, 성장거동을 나타낸 것이다. 이 보조균열도 수명의 10% 근처에서 피로균열이 발생하여 성장함을 알 수 있다. 이 피로균열의 성장곡선을 Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에 각각 ○기호로 나타내었다. 따라서 Fig. 3 및 Fig. 4와 같

은 표면균열길이의 절반 a의 자료를 이용하여 그 성장속도와 파괴역학적 인자인 응력확대계수에 의하여 비교 검토하였다.



Proto. 2 Fracture surfaces showing multiple crack origins and temper colored crack configurations



Proto. 3 Growth behavior of sub-crack

$\sigma_{max} = 441MPa$

$N_f = 18.1 \times 10^4 \text{ cycles}$

3.3 균열면 형상의 변화

Photo 2는 Photo 1을 관찰했던 시험편의 파단면상의 표면균열의 성장거동을 템퍼 칼러법에 의하여 관찰한 일례를 나타내고 있다. 사진상의 파단면과 같이 F1과 F2는 서로 접근하여 합체되어 파단에 달함을 알 수 있다. 또한 이러한 표면균열의 표면상 및 깊이방향의 성장거동을 조사하여 주균열의 표면길이와 깊이의 형상비(aspect ratio) b/a 즉 균열면 형상의 균열 성장에 따른 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5상에는 작은 표면 노치에서 발생 성장하는 표면균열의 형상비를 서로 비교하기 위하여 동일재의 작은 표면결합시험편의 자료와 SUS 304재, S15C(G, H)재의 결과를 동시에 나타내었다. 이 데이터에서 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

첫째, 균열의 성장과 더불어 b/t 가 0.4이상에서 b/a 가 약 0.9까지는 거의 타원에 가깝게 되며 표면노치재의 자료와 서로 일치하는 경향을 나타내었다.

둘째, 균열의 성장과 더불어 b/a 가 서서히 저하하고 b/t 가 0.5이상에서는 평면화 되는 경향을 나

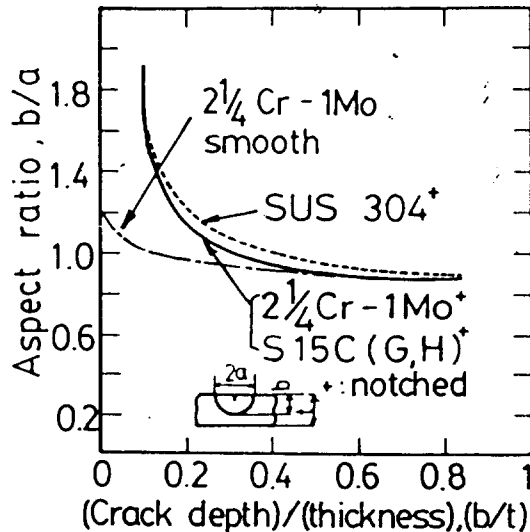


Fig. 5 Variation of aspect ratio and depth ratio

타낸다.

셋째, b/t 가 0.4보다 적은 경우에는 피트상의 결과와는 달리 반원의 형상임을 알 수 있다.

3.4 깊이방향의 균열성장거동

Fig. 5와 같은 균열형상비의 자료를 이용하여 Fig. 3(c) 및 Fig. 4(c)와 같은 표면균열길이의 자료를 깊이방향으로 변환시키면 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)와 같은 균열깊이 방향의 성장거동을 파악할 수 있다. 이와같은 깊이방향의 표면균열의 발생, 성장특성은 Fig. 3(c)와 Fig. 4(c)의 표면에서의 성장거동

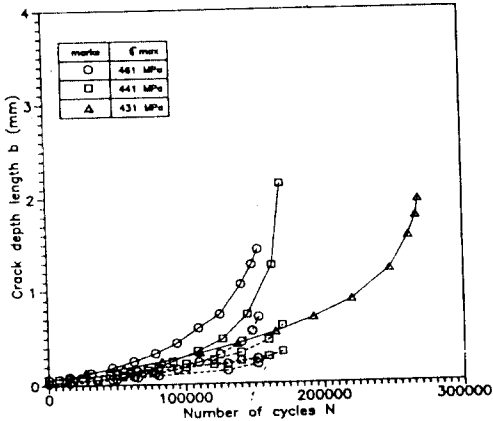


Fig. 6(a) Growth behavior of major crack and sub-crack in crack depth

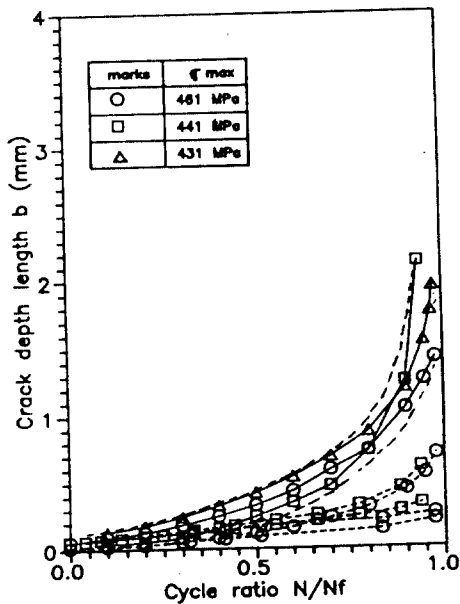


Fig. 6(b) Variation of crack depth of major crack and sub-crack as a function of cycle ratio

의 특성과 비슷하였다. 즉 주균열의 성장거동은 좁은 밴드에 들어가고 보조균열은 밴드밖에 있으며 각각 원활하게 성장함을 알 수 있다.

3.5 표면균열 성장특성의 파괴역학적 정리

상기의 모든 실험결과를 기초로 하여 평활재에서 발생, 성장하는 미소한 표면균열의 성장특성을 발생 직후에서부터 파단에 이르는 전 과정에 관하여 파괴역학적 평가를 시도하였다. Fig. 7은 본 연구와 같은 고압용기강재의 평활표면상의 작은 인공적인 표면결함을 가공한 시험편의 깊이방향 성장 데이터를 사용하여 깊이방향의 응력확대계수범위 ΔK_{Ib} 를 계산하고 그 결과를 CT 시험편의 결과와 중첩시켜 나타낸 것이다. 이때 균열성장곡선은 본 연구와 같은 실험조건하에서 실시된 표면균열의 성장곡선을 이용하였다. Fig. 7과 같이 응력확대계수의 값은 네가지 계산방법에 따라 상당한 차이

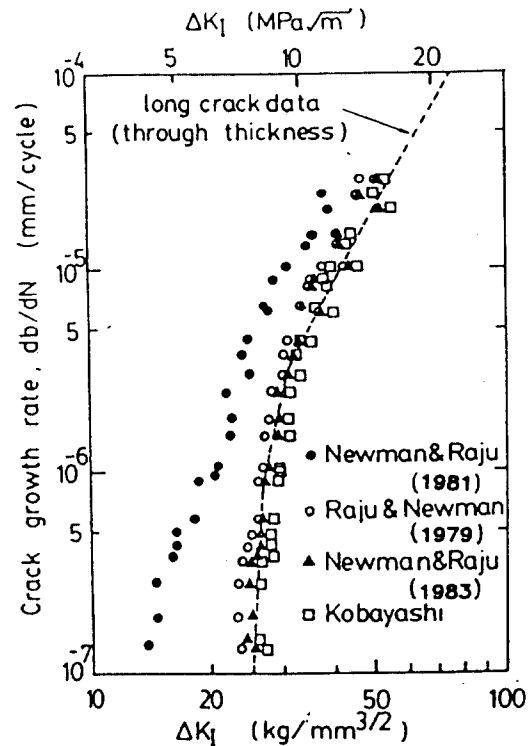


Fig. 7 A comparison of stress intensity factor range by the four kind of equations (8)

를 나타내고 있으며 이들 네가지 방법으로 계산된 결과와 CT시험편을 사용한 관통대균열의 데이터⁹⁾와 비교해 볼때 1983년도에 발표한 Newman-Raju식¹⁰⁾에 의한 방법이 가장 잘 일치함이 보고되고 있다.⁸⁾ 따라서 이들 결과를 토대로 하여 본 연구에서는 표면균열 성장률 da/dN 혹은 깊이성장을 db/dN 와 표면상의 응력확대계수 K_{Ia} 값의 계산은 가장 최근에 보고된 식(1)과 같은 Newman-Raju식¹⁰⁾에 의해 계산하였다.

$$da/dN = C(\Delta K_{Ia})^m$$

$$\Delta K_{Ia} = \Delta\sigma \sqrt{\pi a} f(a) \tag{1}$$

$$f(a) = \sqrt{b/(a \cdot Q)} \cdot F$$

$$Q = 1 + 1.464(b/a)^{1.65}$$

$$F = [M_1 + M_2(b/t)^2 + M_3(b/t)^4] f\phi \cdot g \cdot f_w$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(b/a)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89/[0.2 + (b/a)]$$

$$M_3 = 0.5 - [1.0/(0.65 + (b/a)) + 14(1.0 - b/a)^{24}]$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(b/t)^2](1 - \sin \phi)^2$$

$$f\phi = [(b/a)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi]^{1/4}$$

$$f_w = [\sec(\pi a/2w) \cdot \sqrt{b/t}]^{1/2}$$

- 여기서 $\Delta\sigma$ = remote uniform tensile stress range
- a : half-length of surface crack
 - b : depth of crack
 - w : width of cracked plate
 - F : boundary-correction factor on stress intensity
 - f_w : finite-width correction factor
 - $f\phi$: angular function derived from elliptical crack solution
 - Q : shape factor for an elliptical crack
 - ϕ : parametric angle of the ellipse
 - M_i : curve fitting functions

Fig. 8(a)에는 평활재상에서 발생, 성장하는 주균열의 표면방향으로의 성장속도와 응력확대계수의 관계를 세가지 응력레벨에 따라 각각 ○, □, △기호로 나타내었다. 또한 Fig. 8(b)에는 보조균열의 성장거동도 나타내었고 Fig. 8(c)는 두가지 그림을 동시에 나타내었다. 또한 Fig. 9는 주균열과 보조균

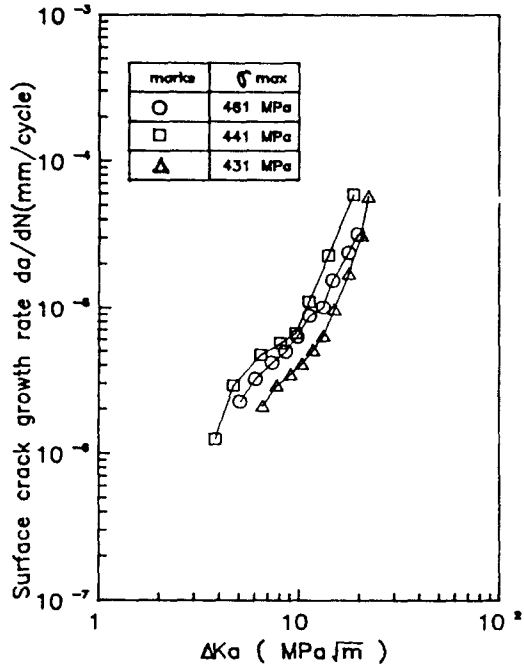


Fig. 8(a) Dependence of surface crack growth rate of major crack upon the stress intensity factor range

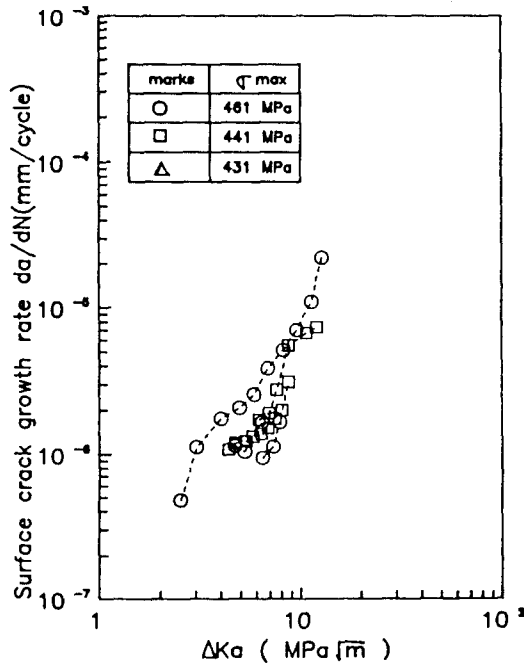


Fig. 8(b) Dependence of surface crack growth rate of sub-crack upon the stress intensity factor range

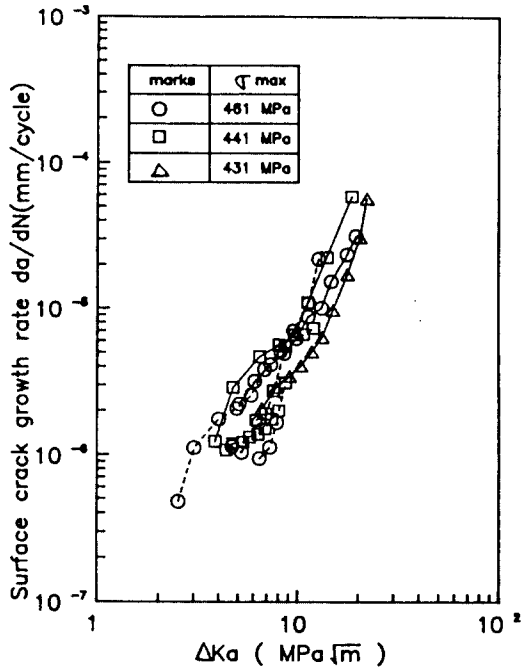


Fig. 8(c) Dependence of surface crack growth rate of major crack and sub-crack upon the stress intensity factor range

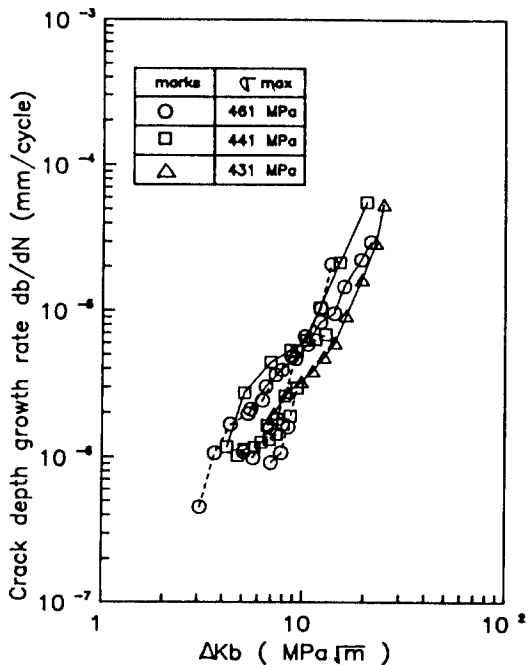


Fig. 9 Dependence of the crack depth growth rate of major crack and sub-crack the stress intensity factor range

열의 깊이방향의 성장거동을 응력확대계수로 동시에 나타낸 것이다.

Fig. 8(a)와 Fig. 9의 주균열의 $da/dN - \Delta K_a$ 및 $db/dN - \Delta K_b$ 로 나타낸즉 대형관통균열재와는 달리 약간의 분산폭이 생김을 알 수 있었다. 또한 Fig. 8(b)와 같이 보조균열의 결과는 분산폭은 크지만 Fig. 8(c)와 Fig. 9와 같이 좁은 밴드폭내에 모임을 알 수 있다. 이 그림들에서보면 Fig. 4(c)와 Fig. 6(b)와 같이 주균열의 성장거동과 차이가 있어 좁은 밴드폭외로 벗어나 있는 보조균열의 성장특성은 $da/dN - \Delta K_a$ 곡선 및 $db/dN - \Delta K_b$ 곡선상에서는 동일응력레벨인 ○표시의 461MPa인 자료들에 있어 그 거동이 비슷한 경향을 가지지만 Fig. 8(b)와 같이 자료의 분산폭이 확실히 큼을 알 수 있다. 이와같은 미소한 표면균열의 성장특성은 평활재상의 많은 균열을 관찰하여 그 성장거동을 해석, 분석할때 주균열을 찾는것이 제일 바람직하지만 만일 주균열을 찾지 못해도 균열성장률과 피로수명을 어느정도 예측가능하지만 주균열보다 그 성장특성이 미약하므로 그 오차가 크게 됨을 시사하고 있다.

또한 평활재에서 발생, 성장하는 미소 표면피로균열의 성장특성을 동일재료의 인공 피트결합재¹⁾와 관통균열자료²⁾의 차이를 비교하기 위하여 각각의 성장특성 데이터의 분산폭을 중첩시켜 Fig. 10에 나타내었다. 즉 Fig. 10상의 점선 밴드로 표시한 데이터를 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm의 인공으로 가공한 작은 표면결합재³⁾의 성장특성 데이터를 나타내고 있다. 그리고 실선으로 나타낸 관통균열자료는 CT시험편상의 자료⁴⁾이다.

이 그림에서 알 수 있는 바와같이 실선인 관통균열재와 점선밴드인 인공결합재의 자료는 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 평활재 및 인공 피트 결합재사이의 성장특성에는 다소의 차이가 있음을 알 수 있다. 균열발생초기에 있어서의 낮은 ΔK_b 값에서는 평활재의 균열성장속도가 인공결합재의 경우보다 훨씬 빠름을 알 수 있다. 이와같은 현상은 전형적인 미소한 균열(microcrack)의 성장특성을 나타내고 있다.^{1), 3)} 그러나 평활재상의 미소 표면균열도 어느정도 성장하여 크게 되면 작은 인공 피트재의 자료와 관통재의 자료가 서로 부분적으로 일치함을 알 수 있다.

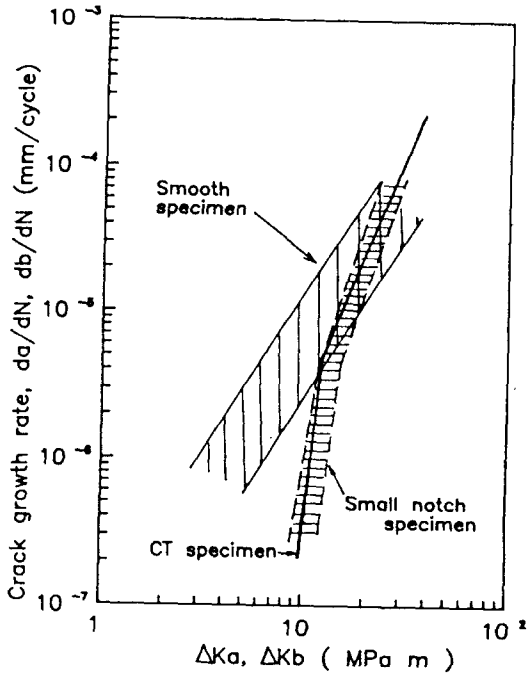


Fig. 10 Comparison of crack growth rate of micro-crack on smooth specimen with those of a small notch specimen and CT specimen

4. 결 론

평활재의 표면상에서 발생, 성장하는 미소한 표면균열의 발생, 성장거동을 연구하기 위하여 고압 용기강재인 2^{1/4} Cr-1 Mo 재료를 모래시계 형상으로 가공하고 상온하에서 응력비 R=0.05의 하중 제어 피로시험을 실시하여 미소한 표면피로균열의 성장거동을 파괴역학적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다,

1) 응력레벨의 차이에도 불구하고 평활재상에서 발생 성장하여 피로수명을 좌우시키는 주균열(major crack)의 표면균열길이 및 균열깊이는 임의의 반복수비(N/N_i)에서 좁은 밴드내에 모이는 특성을 가졌다. 그러나 보조균열(subcrack)은 이러한 성장 곡선의 밴드에서 벗어났다.

2) 표면균열길이 및 균열깊이의 성장속도 da/dN 및 db/dN를 Newman-Raju(1983)식의 ΔK_{Ia} 및 ΔK_{Ib} 에 대하여 정리한 결과 응력레벨의 차이에 따른 다소의 응력의존성이 발생하였다.

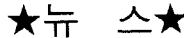
3) 보조균열의 표면균열길이 및 균열깊이의 성장속도 da/dN, db/dN을 ΔK_{Ia} 및 ΔK_{Ib} 에 대해 정리하면 주균열을 포함하는 분산폭내에 모이는 경향을 나타내었다. 이러한 특성은 주균열에 의한 성장특성과 수명예측이 제일 바람직하지만 보조균열에 의한 수명추정 및 성장거동의 파악이 부분적으로 가능함을 알았다.

4) 평활재상의 미소한 표면균열의 성장거동을 피로수명의 초기에는 작은 인공피트재와 관통균열재의 자료보다 그 성장률이 빠르지만 수명의 후기에는 그것의 자료와 부분적으로 일치하는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) Kitagawa, H., S. Takahashi, C. M. Suh and S. Miyashita, "Quantitative Analysis of Fatigue Process—Micro Cracks and Slip Line Under Cyclic Strain," ASTM STP 675, pp. 420~449, 1979
- 2) Kitagawa, H., C. M. Suh et al., "Mechanical and Non-Mechanical Categories in Crack Problems in Fatigue," ASME, AMD—Vol. 47, pp. 167~184, 1981
- 3) Suh, C. M. and H. Kitagawa, "Crack Growth Behavior of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels," Fatigue Fract. Engng. Mater. Structure, Vol. 9, pp. 409~424, 1987
- 4) 서창민, 김규남, "SUS 304강의 상온하 표면균열의 발생 성장거동에 관한 연구," 대한 기계학회 논문집 제 8-3 pp. 195~200, 1984
- 5) De Los Rios, E. R., Hussain, J. Mohamed and K. J. Miller "A Micro-Mechanics Analysis for Short Fatigue Crack Growth," Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 8, pp. 49~63, 1985
- 6) De Los Rios, E. R., Z. Tang, and K. J. Miller, "Short Crack Fatigue Behavior in a Medium Carbon Steel," Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 7, pp. 97~108, 1984
- 7) 김규남, 서창민의 3명, "연강의 고온표면 피로균열의 성장거동에 관한 연구," 대한기계학회

- 논문집 제 7-4, pp. 425~433, 1983
- 8) Suh, C. M., R. O. Ritchie and Y. G. Kang, "Fatigue Crack Growth Behaviors of the Short Surface Crack in 2¼ Cr-1Mo Steel," KSME Journal Vol. 3-2, pp. 78~85, 1989
 - 9) Suresh, S., G. F. Zamiski, and R. O. Ritchie, "Fatigue Crack Propagation Behavior of 2¼ Cr-1Mo Steel for Thick-Wall Pressure Vessels," ASTM STP 755, pp. 49~67, 1982
 - 10) Newman, J. C. Jr., and I. S. Raju, "Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies," ASTM STP 791, pp. 1-238~265, 1983
 - 11) Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure," ASTM STP 486, pp. 230~242, 1971
 - 12) Staal, H. H. and J. D. Elen, "Crack Closure and Influence of Cycle Ratio R on Fatigue Crack Growth in Type 304 Stainless Steel at Room Temperature," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 275~283, 1979
 - 13) Leis, B. N., "Displacement Controlled Fatigue Crack Growth in Inelastic Notch Fields: Implication for Short Cracks," Engineering Frac. Mechanics, pp. 279~293, 1985
 - 14) Paris, P. C., and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Trans. ASME, J. Basic Eng, Vol. 85, No. 4, pp. 528~534, 1963
 - 15) Kitagawa, H., T. Fujita, and K. Miyazawa, "Small Randomly Distributed Cracks in Corrosion Fatigue," ASTM STP 642, pp. 98~114, 1978



Journal of Structural Engineering

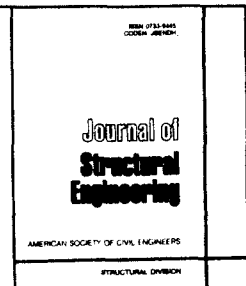
EDITOR

James T. P. Yao, P.E.
Texas A&M University

PUBLICATIONS COMMITTEE

Richard J. Balling, Franklin Y. Cheng, Karen Chou, Steven M. Cramer, H. Everett Druggie, Gregory Fennes, Louis F. Geschwindner, Leonard Joseph, Ahsan Karæem, R. P. Kennedy, James Morgan, Arturo E. Schultz, Farrel Zwerneman

Journal of Structural Engineering reports on the science and practice of structural design. Authors discuss the physical properties of engineering materials, such as steel, concrete, and wood; develop methods of analysis and design; and study the relative merits of various types of structures and methods of fabrication. Topics include the behavior, design, erection, safety, assessment and evaluation of structures, ranging from bridges to transmission towers and tall buildings.



Monthly 1991
\$240.00 Domestic U.S.

Recent Contributions

- Analytical Parameter Study for Class of Elastomeric Bearings
Leonard R. Herrmann, Ananth Ramaswamy, and Ramin Hamidi
- Structural System Reliability Using Linear Programming and Simulation
Ross B. Corotts and Avinash M. Nafday
- Optimization of Structural Design Checking
Mark G. Stewart and Robert E. Melchers
- Instrumentation and Testing of Bridge Rehabilitated with Exodermic Deck
Mark S. Darlow and Neal H. Bettigole
- Lateral Buckling in Curtain Wall Systems
Charles D. Clift and Walter J. Austin
- Cyclic Load Behavior of Bolted Timber Joint
Robert E. Abendroth and Terry J. Wipf
- Web-Crippling Strength of Cold-Formed Steel Beams
C. Santaputra, M. B. Parks, and W. W. Yu

1991 Volume 117
ISSN 0733-8445; CODEN: JSENDH
Monthly U.S. Domestic \$240.00
Foreign \$281.00

ASCE member price Domestic \$ 60.00
ASCE member price Foreign \$101.00
Subscriptions entered for calendar year only.
Sample issues available on request.
Subscriptions entered with prepayment only.

ASCE Authors' Guide available on request.
Inquiries regarding new subscription information, back volumes, single issues, reprints and microfilm should be directed to:

Sales and Marketing
American Society of Civil Engineers
345 East 47th Street
New York, N.Y. 10017