

(論 文)

SB41 강의 표면 피로균열 진전 특성에 관한 연구

배원호* · 김상태** · 이택순**

(1990년 12월 8일 접수)

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior of Surface Cracks in SB41 Steel Plate

Won Ho Bae, Sang Tae Kim and Taik Soon Lee

Key Words : Surface Crack(표면균열), Aspect Ratio(형상비), Crack Growth Rate(균열성장속도), Crack Opening Ratio(균열개구비), Effective Stress Intensity Factor Range(유효 응력확대계수 범위), J Integral Range(J 적분 범위)

Abstract

Fatigue crack growth behavior of surface crack was investigated in the plate of SB41 steel under tensile fatigue load. The shapes of surface crack were observed with respect to the crack growth by beach mark method. The aspect ratio was decreased with the crack growth, so that the surface crack growth rate was higher than that in depth direction. The crack opening ratio, U was increased with the crack growth when the maximum loading stress was lower than yield stress of the specimen, but U was nearly constant value of 0.65 when the maximum loading stress was higher when yield stress. The relation between the crack growth rate and fracture mechanics parameters; effective stress intensity factor range, ΔK_{eff} and J integral range, ΔJ were studied at four maximum loading stress levels. From this study, It was found that ΔK_{eff} was profitable when the maximum loading stress was lower than yield stress of the material, and ΔJ was useful in wide ranges of loading stress level.

기 호 설 명			
a	: 표면균열의 길이(mm)	K'	: 반복하중 재료정수
a_{eq}	: 등가 균열길이(mm)	M_R	: 전(前)표면 보정계수
$2c$: 표면균열의 표면부 길이(mm)	n	: 가공 경화 지수
da/dN	: 길이방향 균열 진전속도(mm/cycle)	n'	: 반복 가공 경화 지수
dc/dN	: 표면방향 균열 진전속도(mm/cycle)	t	: 시험편의 두께(mm)
E	: 재료의 탄성계수(MPa)	$2W$: 시험편의 폭(mm)
f_w	: 시험편 폭 영향 계수	δ	: 변위(mm)
H	: 시험편 고정부 사이의 거리(mm)	$\Delta\delta_{eff}^p$: 유효변위 범위의 소성성분(mm)
J^e	: J 적분의 탄성 성분	$\Delta\epsilon^e$: 변형률 범위의 탄성 성분
J^p	: J 적분의 소성 성분	$\Delta\epsilon^p$: 변형률 범위의 소성 성분
		$\Delta\epsilon_{eff}^p$: 유효변형률 범위의 소성성분
		ΔJ	: J 적분 범위(N-m/m ²)
		ΔK_{eff}	: 유효 응력 확대계수 범위(MPa m ^{1/2})

* 정희원, 경북산업대학 기계공학과

** 정희원, 영남대학교 공과대학 정밀기계공학과

$\Delta\sigma_{eff}$: 유효응력 범위 (MPa)

1. 서 론

표면 균열은 일반적으로 부식 또는 소재의 표면 결함 등으로 부터 발생한 작은 균열이 반 타원형 형태로 성장하면서 갑자기 파괴에 이르므로 이러한 파괴를 방지하기 위한 중요성이 공업적 및 공학적으로 인정되어 지금까지 비교적 많은 연구 대상이 되어져 왔다.

Newman, Raju등⁽¹⁾은 유한요소법에 의하여 표면 균열의 응력 확대계수를 계산하고 임의 형태의 표면 균열 첨단에서의 응력 확대계수를 계산하는 관계식을 발표하였으며, Isida 또는 Nisitani등⁽²⁾은 체적력법으로 응력확대 계수를 구하였다. 그밖에 Yuuki등⁽³⁾, 박등⁽⁴⁾은 경계요소법에 의하여 표면 균열의 응력 확대계수를 계산하였다.

Parks⁽⁵⁾는 저응력 하의 표면 균열에 대하여 3차원 탄소성 유한요소법에 의한 J 적분 값을 구하였으며, Rice등⁽⁶⁾, Shiratori등⁽⁷⁾은 표면 균열을 2차원 라인 스프링 모델로 전환하여 수치해석 하는 방법을 제안 하였다. 한편 Read등⁽⁸⁾은 실험적 방법에 의하여 J 적분값을 구하였다. Dowling⁽⁹⁾은 J 적분 범위, ΔJ 를 사용하여 탄소성 범위 내의 피로균열 성장률을 해석하였으며, Tanaka등⁽¹⁰⁾은 등가 균열장에 의한 근사법과 균열 중앙 개구 변위량을 사용하여 ΔJ 의 값을 계산하는 방법을 제안하였다. Hatanaka등⁽¹¹⁾은 표면균열 저사이클 피로 수명 예측등에 Tanaka의 방법을 적용하였으며, Hatanaka^(12,13), 서등⁽¹⁴⁾은 반복 전 스크레인 확대계수 범위를 사용하여 탄소성 범위의 값을 구하였다.

위와 같은 연구 경향과 배경하에서 본 연구는 표면 균열이 있는 평판의 탄소성 피로하중 상태에서 성장하는 균열 형태의 변화와, 작용하는 응력의 크기에 따른 균열 개폐구 특성의 변화를 연구하였다. 또, 유효 응력 확대계수 범위, ΔK_{eff} 와 J 적분 범위, ΔJ 가 탄소성 응력상태에서의 표면 피로균열 진전속도를 나타내는 역학양으로 사용되는데 따른 적합성등을 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료와 시험편

실험에 사용한 재료는 일반 구조용 강재인 SB41

Table 1 Mechanical properties of SB41 steel

Yield strength	245 MPa
Ultimate strength	461 MPa
Elastic modulus	20.7GPa
Poisson's ratio	0.3

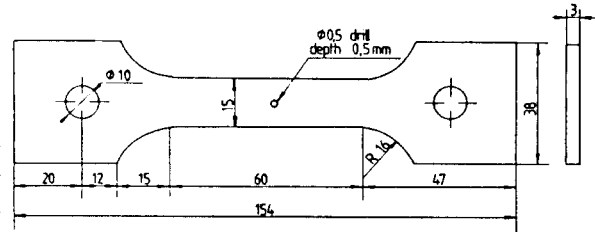


Fig. 1 Configuration and dimensions of the fatigue specimen

강이며, 그 화학적 성분은 전보(前報)⁽¹⁵⁾와 같으며 기계적 성질은 Table 1과 같다.

시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 시험편의 중심에 지름 0.5mm의 구멍을 깊이 0.5mm로 뚫었고 이 시험편 두께는 3mm이다. 피로균열의 측정은 표면 길이를 1.5mm~2mm만큼 성장 시킨 이후에 실시하였다. 시험편 표면은 600#, 800#, 1200#의 연마지를 사용하여 표면 가공하고, 3/10 μ m, 5/100 μ m의 알루미나 분말을 사용하여 시험편 표면을 경면화하였다.

유압식 피로시험기를 사용하여, 피로 하중을 정현파형으로 부하하였다. 하중제어는 응력비 $R=0$ 으로 하였으며, 최대응력의 크기는 196MPa, 235MPa, 275MPa, 300MPa등 네 가지를 사용하였다. 피로 시험 속도는 하중 상태에 따라 10Hz~0.8Hz의 범위로 조정하였고, 그래프를 그릴때는 0.8Hz로 떨어뜨려 그렸으며, 오실로스 코프도 사용하였다.

2.2 균열 길이와 균열 개폐구의 측정

균열 길이는 시험기에 설치한 정밀도 0.005mm이 이동 현미경을 사용하여 측정하였으며, 균열 개폐구의 측정은 전보(前報)⁽¹⁵⁾와 같이 제하(除荷) 컴프라이안스 법을 사용하였다. 균열 표면 첨단에서의 균열 개폐구점을 찾기 위하여 Fig. 2와 같이 균열 선단 전방에 게이지 길이 2mm의 스트레인게이지를 핏치 3mm로 설치하고, 또 균열 심부(沈深部)

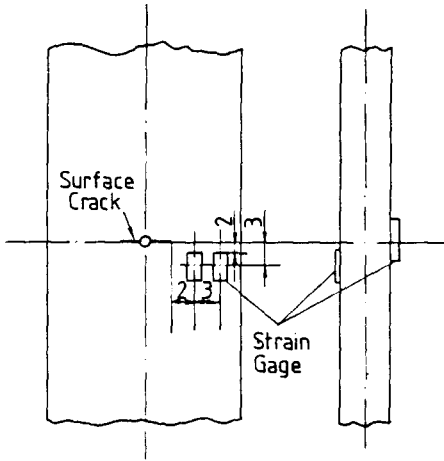


Fig. 2 The position of attached strain gage (mm)

의 균열 개폐구점을 찾기 위하여는 균열부 뒷면에도 스트레인 게이지를 그림과 같이 설치하였다. 표면상은 균열이 성장하므로 균열 선단에서 가장 가까운 스트레인 게이지에서 나오는 스트레인 값을 선택하였다.

스트레인 게이지에서 나오는 스트레인 변화와 로드셀에서 나오는 하중 신호를 이용하여 균열 선단의 스트레인 변화가 잘 나타나도록 감산회로 (subtraction circuit)에서 증폭, 감산하였다. 이 하중과 변위값으로 X-Y프로터에서 전보(前報)⁽¹⁵⁾와 같이 $P, \epsilon - aP$ 선도를 그려서 균열 개폐구점을 결정하였으며, 오실로스코프도 병용하였다.

2.3 응력 변형률 선도

Fig. 3에는 단순인장 시험에서 얻은 $\sigma - \epsilon$ 선도와 피로시험에서 얻은 $\sigma - \epsilon$ 선도를 비교하였다. 이때 피로시험에서 얻은 $\sigma - \epsilon$ 선도는 각 응력 레벨하에서 반복 회수가 피로수명의 50%일 때의 안정된 히스테리시스 루프에서 얻은 결과이며 식 (1)과 같이 표현된다⁽¹⁶⁾.

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon^e + \Delta\epsilon^p = \Delta\sigma/E + (\Delta\sigma/a')^{1/n'} \quad (1)$$

식 (1)은 재료의 스트레인 경화 현상을 나타내는 Ramberg Osgood의 구성식과 비슷한 식 (2)의 형태로 표시된다^(17,18).

$$\Delta\epsilon/2 = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2k'}\right)^{1/n'} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)는 근사하다고 가정하면 본 연구에서는 $k'=1.248$ GPa, $n'=0.218$ 의 값을 얻었다.

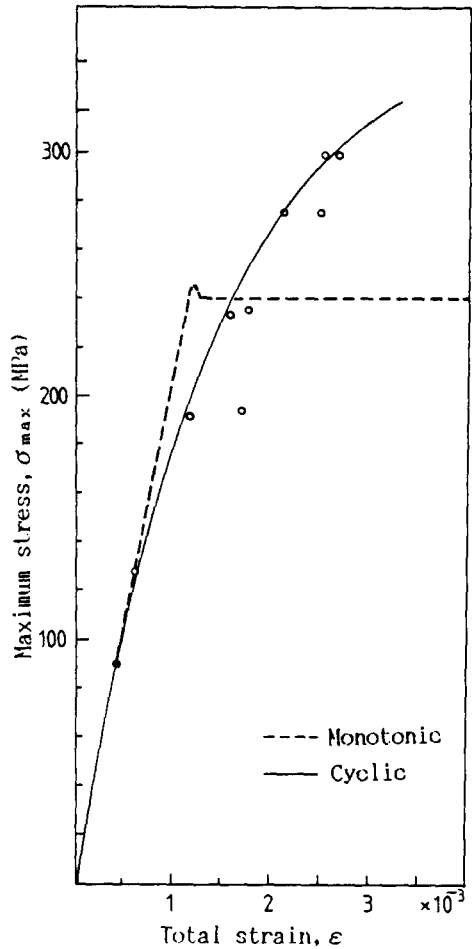


Fig. 3 Comparison of monotonic and cyclic stress-strain curves of SB41 steel

3. 이론 해석

3.1 표면 균열의 응력 확대계수

본 연구에서는 Fig. 4와 같은 기호아래 식 (3)과 같은 Raju, Newman식을 사용하여 표면 균열 선단의 응력 확대 계수를 계산하였다^(1,19).

$$K_I = \frac{\sigma}{E(k)} \sqrt{\pi a} (\sin^2\phi + \frac{a^2}{c^2} \cos^2\phi)^{1/4} F \quad (3)$$

$$F = \left\{ M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right) \right\} f_{wg}$$

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

$$M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/c)$$

$$M_3 = 0.5 - 1.0/(0.65 + a/c) + 14(1 - a/c)^{24}$$

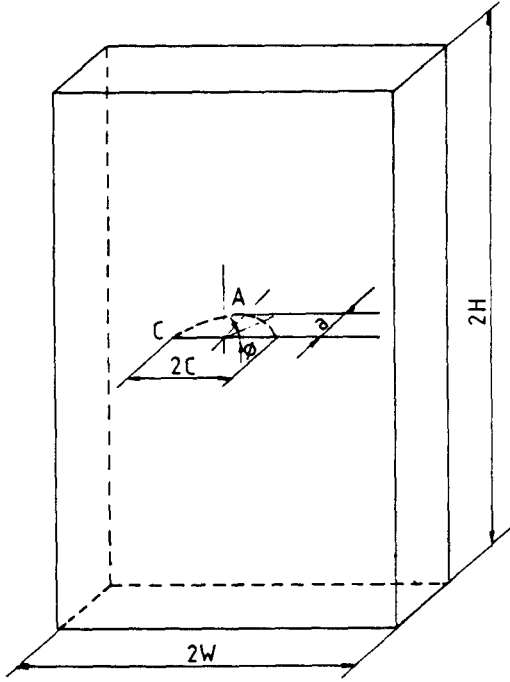


Fig. 4 Schematic shape of fatigue surface crack and symbols

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

$$f_w = \left\{ \sec\left(\frac{\pi c}{2W}\sqrt{a/t}\right) \right\}^{1/22}$$

식 (3)에서 $E(k)$ 는 2종 타원 적분 값이며 근사적으로 다음과 같다.

$$E(k) = \sqrt{1 + 1.464(a/c)^{1.65}}$$

식 (3)은 인장과 굽힘이 동시에 작용하는 경우에 사용할 수 있도록 만들어진 식이지만 본 연구에서는 굽힘 응력 성분은 거의 작용하지 않으므로 굽힘 응력 성분은 무시하였다.

3.2 J적분 범위의 값

J적분 값은 Tanaka가 제안한 등가 균열장에 의한 방법으로 평가하였다⁽¹⁰⁾. 즉 표면 균열의 응력 확대 계수 값, K 와 같은 크기의 등가 균열 길이 $2a_{eq}$ 가 무한판에 있다고 가정한다. Newman, Raju의 해 식 (3)을 바꾸어 표현하면 식 (4)로 된다.

$$K = \frac{M_R}{E(k)} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

식 (4)는 무한판의 등가길이에 의한 응력확대계수의 값과 같으므로 식 (5)의 관계로 되며 등가균

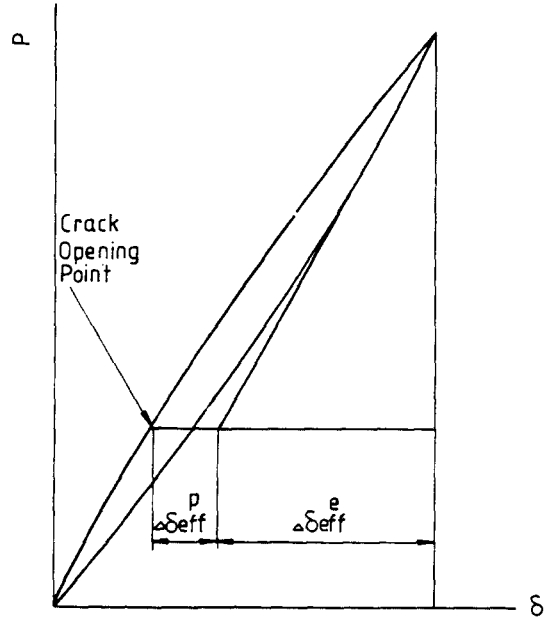


Fig. 5 Cyclic load-displacement curve and symbols

열길이 a_{eq} 는 식 (6)과 같다.

$$\frac{M_R}{E(k)} \sigma \sqrt{\pi \cdot a} = \sigma \sqrt{\pi \cdot a_{eq}} \quad (5)$$

$$a_{eq} = \{M_R/E(k)\}^2 a \quad (6)$$

한편 무한판상의 균열 길이 $2a$ 인 J적분 값은 Shih-Huchinson의 해로부터 식 (7)과 같이 표현된다⁽²⁰⁾.

$$J = J^e + J^p = \frac{(\sigma \sqrt{\pi \cdot a})^2}{E} + f_1(n) \sigma \epsilon^p a$$

$$= \{\pi \sigma^2/E + f_1(n) \cdot \sigma \epsilon^p\} a \quad (7)$$

여기서 $f_1(n)$ 은 다음과 같다.

$$f_1(n) = 3.85(1-n)/\sqrt{n} + \pi n$$

등가 길이에 대하여는 식 (7)은 식 (8)로 된다.

$$J = \{\pi \sigma^2/E + f_1(n) \cdot \sigma \epsilon^p\} a_{eq} \quad (8)$$

Fig. 5에 나타낸 $P-\delta$ 선도에서 δ_{eff}^p 를 유효변위 범위의 소성 성분이라하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 주어진다^(10,18).

$$\Delta J = \{\pi \Delta \sigma_{eff}^2/E + f_1(n) \Delta \sigma_{eff} \Delta \epsilon_{eff}^p\} a_{eq} \quad (9)$$

$$\text{단 } \Delta \epsilon_{eff}^p = \frac{\Delta \delta_{eff}^p}{2H}$$

계산에 사용된 $P-\delta$ 곡선은 시험기에 설치된 L.V.D.T에서 출력된 변위량 δ 의 값과 피로시험기의 출력 하중을 사용하여 X-Y프로터에서 그렸다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 균열 형상과 균열 형상비

균열 성장에 따른 표면 균열 형상의 변화는 비취마크법을 사용하여 조사하였다. 비취마크를 생성시키기 위하여 응력레벨의 크기를 변화시키면서 여러 단계의 피로균열을 진전시켰다. 피로균열 길이의 측정은 정밀도 0.005mm의 이동 현미경을 사용하였다. 즉 피로 시험중 균열의 균열 표면부의 길이를 측정하여 두고, 그에 대응되는 깊이 방향의 균열 길이를 피로 과단후의 비취마크에 의하여 결정하였다.

Fig. 6은 다섯개의 시험편으로부터 측정한 균열 형상비(a/c)와 표면 균열 길이 c 와의 관계를 나타낸 것이다. 작은 결함으로부터 발생한 초기 표면 균열의 형상비(a/c)는 반원인 1에 가깝지만 균열의 크기가 커질수록 형상비는 감소하며 표면쪽의 균열 길이가 깊이 방향보다 길어지는 반타원 형상으로 되었다. 따라서 균열이 성장할수록 균열 표면부의 균열 성장 속도는 균열 깊이방향의 균열 성장 속도보다 커지게 된다.

4.2 균열 진전속도와 유효 응력확대계수 범위

시험편에 작용하는 하중의 최대값을 P_{max} , 최소

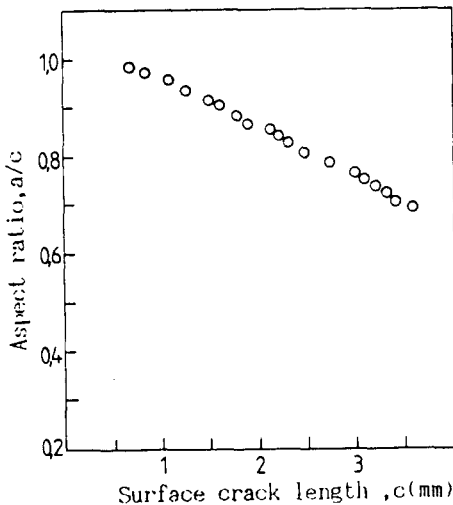


Fig. 6 Relation between aspect ratio and surface crack length

값을 P_{min} , 균열 개구하중을 P_{op} 이라고 하면 균열 개구비 U 는 식 (10)과 같이 주어진다.

$$U = \frac{P_{max} - P_{op}}{P_{max} - P_{min}} \quad (10)$$

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 최대응력의 크기에 따라 균열 개구비, U 의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 7은 최대응력 레벨이 항복응력보다 낮은 $\sigma_{max}=196$ MPa이 작용하는 경우로서 균열 개구비의 균열 표면부(Δ)와 균열 깊이부(\circ)의 값이 균열 성장에

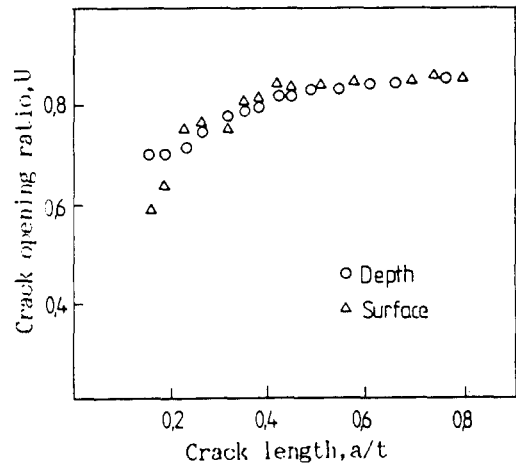


Fig. 7 Relation between crack opening ratio and crack depth versus the thickness of plate at $\sigma_{max}=196$ MPa

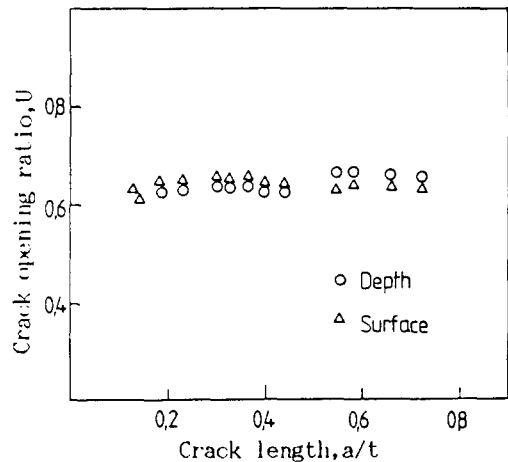


Fig. 8 Relation between crack opening ratio and crack depth versus the thickness of plate at $\sigma_{max}=275$ MPa

따라 약 0.6에서 점차 증가하고있다. 이것은 Tanaka등⁽¹⁰⁾ Suh등⁽²¹⁾의 연구 결과와도 비슷한 경향이다.

Fig. 8은 최대 응력 레벨이 항복응력 보다 높은 $\sigma_{max}=275\text{MPa}$ 이 작용하는 경우로서 균열 개구비, U 는 균열 길이의 변화에 관계없이 0.65정도로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이러한 현상은 균열 개구비, U 의 값은 균열의 크기와 관계있을 뿐 아니라 작용하는 응력 레벨의 값에도 관계됨을 의미한다. 이와같이 응력 레벨의 크기에 따라 균열 개구비의 값이 달라지는 것은 응력에 따라 균열 선단 부근의 소성 영역의 크기가 달라지며, 이에따라 균열 개폐구 닫힘 기구의 형태가 변화하기 때문인 것으로 생각된다. 유효 응력 확대계수 범위, ΔK_{eff} 는 응력 확대계수 범위, ΔK 와 균열 개구비, U 값이 주어지며 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\Delta K_{eff} = U \Delta K \tag{11}$$

Fig. 9는 균열의 표면 최첨단점, C에서의 유효 응력 확대계수 범위, ΔK_{effC} 와 표면부의 균열 진전 속도, dc/dN 의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10은

표면 균열의 최심부 A점에서의 유효 응력 확대계수 범위, ΔK_{effA} 와 최심부의 균열 진전속도, da/dN 의 관계를 나타낸 것이다. 두 그림은 본 연구에서 중점으로 하고 있는 작용 응력레벨이 항복응력 이하인 경우와 이상인 경우의 표면균열의 성장 특성을 비교하기 위한 것이다. Fig. 9와 Fig. 10상의 실선은 식 (12), 식 (13)에 나타낸 것과 같이 실단면 응력이 항복응력 이하인 응력 레벨에서의 균열 진전 속도와 유효 응력 확대계수 범위의 관계를 나타낸 것이다.

$$dc/dN = 0.194E-6 \Delta K_{effC}^{1.115} \tag{12}$$

$$da/dN = 0.263E-6 \Delta K_{effA}^{0.939} \tag{13}$$

Fig. 9와 Fig. 10상의 □, △표시는 본 시험편의 항복응력보다 큰 경우의 자료이며 소규모 항복의 실선과 균열 성장 특성이 다른 것을 알 수 있다. 작용 응력이 항복점 이상이 되면 균열 진전 속도와 유효 응력 확대계수 범위와의 관계는 소규모 항복의 균열진전 경향에서 크게 이탈되는 것을 나타내고 있다. 따라서 선형 파괴 역학의 관점에서 출발한 응력 확대계수 범위, ΔK_{eff} 는 비록 균열 개폐

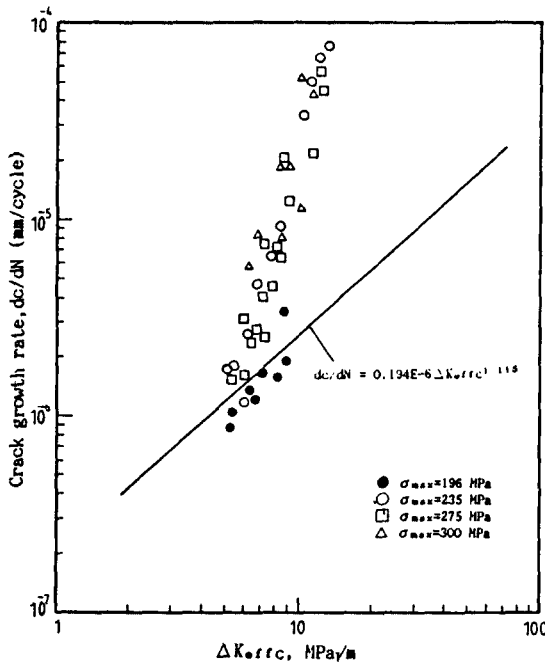


Fig. 9 Relation between crack growth rate of surface and effective stress intensity factor range

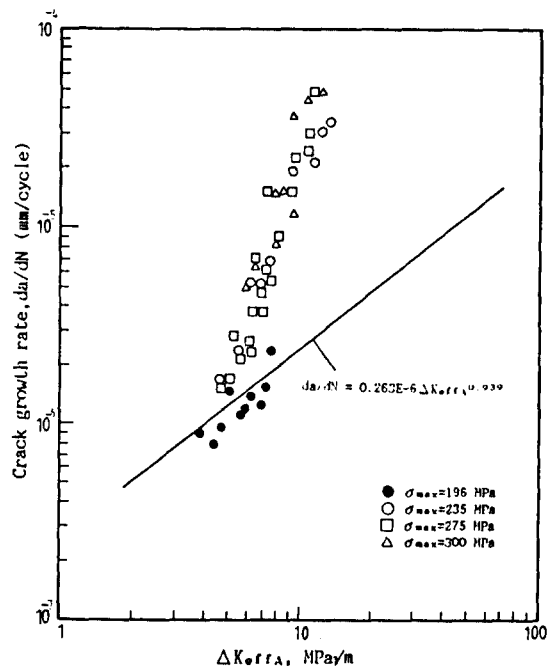


Fig. 10 Relation between crack growth rate of depth and effective stress intensity factor range

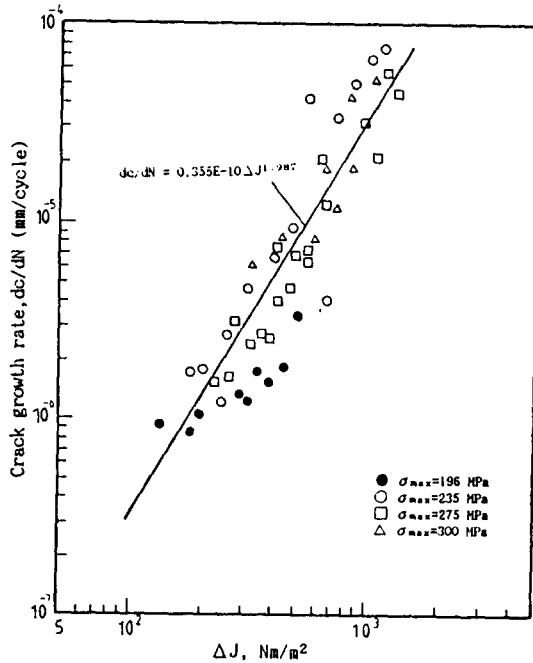


Fig. 11 Relation between crack growth rate of surface and J integral range

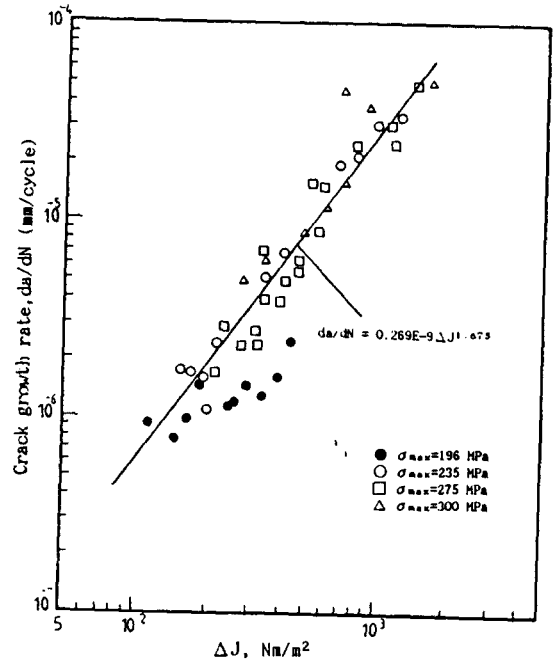


Fig. 12 Relation between crack growth rate of depth and J integral range

구 현상은 고려 되었으나, 그 적용 범위를 선형 파괴 역학이 적용되는 범위로 한정하여 사용하는 것이 합리적이며 바람직하다고 하겠다.

4.3 균열 진전속도와 J 적분 범위

Fig. 11은 표면 균열의 표면상의 균열 진전 속도와 J 적분 범위, ΔJ 와의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 12는 표면 균열의 최심부 A 에서의 균열 진전 속도와 ΔJ 의 관계를 나타낸 것이다. 두 그림상에는 ●, ○, □, 및 △표시인 네가지 응력 레벨의 자료를 동시에 비교하였다. 또 그림상의 실선은 위의 네가지 자료의 균열 성장 거동을 최소 차승법으로 구한 결과를 나타내며 식 (14)와 식 (15)로 표시되었다.

$$dc/dN = 0.355E-10 \Delta J^{1.987} \quad (14)$$

$$da/dN = 0.269E-9 \Delta J^{1.675} \quad (15)$$

Fig. 11과 Fig. 12에서 대부분의 자료가 그림상의 실선과 잘 일치하고 있으나 최대 응력의 값이 항복점 이하의 경우(●표)는, 일부 그 선형적인 관계에서 다소 이탈하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 네가지 응력 레벨하의 작은 표면균열의 성장

거동을 ΔJ 로 나타내면 ΔK_{eff} 보다 탄소성 영역의 넓은 응력 레벨에서 많은 자료들의 통일적인 정리가 가능함을 알 수 있었다.

5. 결 론

표면 균열을 가진 SB41 강판재에 비교적 작용 응력이 큰 탄소성 응력 레벨에서 조사하여, 균열의 형상변화, 균열 표면부와 균열 중심부의 균열 개구비, 표면부와 균열 중심부의 피로균열 진전 속도를 유효 응력 확대계수 범위 및 J 적분 범위등과 관련시켜 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면 균열의 형상비(a/c)는 피로 수명의 초기에는 반원인 1에 가까우나 균열이 성장될 수록 반 타원 형태로 그 값은 점차 감소하였다.

(2) 균열 개구비, U 는 최대 응력의 값이 항복 응력 보다 작은 응력 레벨하에서는 균열의 크기가 커지는데 따라 그 값이 증가하는 경향을 가졌고, 항복 응력보다 커지면 균열 성장에 관계 없이 거의 일정한 값을 가졌다.

(3) 표면 피로 균열 진전속도를 유효 응력 확대

계수 범위, ΔK_{eff} 로 정리할 경우, ΔK_{eff} 의 적용 범위는 실단면 최대 응력 레벨을 항복 응력 이하인 경우로 한정하여 사용하는 것이 바람직하다.

(4) 표면 피로균열 진전 속도를 ΔJ 와 관련하여 표현할 경우, 탄소성 영역의 여러 단계의 응력 레벨에서 통일적인 정리가 가능하였다.

참 고 문 헌

- (1) Newman, J.C., Jr. and I.s. Raju, 1981, "Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies", NASA, Technical Memorandum, 83200, pp. 1-49.
- (2) 西谷弘信, 村上敬宜, 1974, "だ圓板狀き裂および圓板狀き裂の應力擴大係數", 日本機械學會論文集, 第40卷, 第329號, pp. 31-40.
- (3) 結城良治, 江嶋一行, 1990, "境界要素法と影響關數法を用いた表面き裂のK評價・進展解析", 日本機械學會論文集, 第56卷, 第524號, pp. 791-797.
- (4) 박성완, 홍재학, 1990, "경계요소법에 의한 등분포 인장과 굽힘을 받는 유한폭 판재의 혼합 모드 표면 균열에 대한 해석", 大韓機械學會論文集, 第14卷, 第6號, pp.1592-1602.
- (5) Parks, D.M., 1981, "The Inelastic Line-Spring: Estimates of Elastic-Plastic Fracture Mechanics Parameters for Surface-Cracked Plates and Shells", ASME, Vol. 103, pp. 246-254.
- (6) Rice, J.R. Levy, N., 1972, "The Part Through Surface Crack in an Elastic Plate", ASME, 1972, March, pp. 185-194.
- (7) Shiratori, M. and Miyoshi, T., 1983, "Evaluation of J-Integral for Surface Crack", ASTM STP 803, pp. I-410-I-424.
- (8) Cheng, Y.E., MeHenry, M.I., and Read, D.T., 1983, "Crack-Opening Displacement of Surface Cracks in Pipeline Steel Plates", ASTM STP 791, p. II-214.
- (9) Dowling, N.E., 1976, "Geometry Effects and J-Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth", ASTM STP 601, pp. 19-32.
- (10) 星出敏彦, 田中啓介, 1982, "表面缺陷からの疲労き裂傳ばの強塑性破壊力學的解析", 日本機械學會論文集, 第48卷, 第433號, pp. 1102-1110.
- (11) 幡中憲治, 藤満達明, 1985, "機械構造用鋼の底サイクル疲労における表面き裂の進展特性とそれに基づく壽命の評價", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第463號, pp. 790-798.
- (12) Hatanaka, K. and Fujinitsu, T., 1988, "Growth of Small Cracks and Evaluation of Low Cycle Fatigue Life", ASTM STP 942, pp. 257-280.
- (13) 幡中憲治, 藤満達明, 白石進, 1989, "環狀切缺部に生じた表面疲労き裂進展速度に関する弾塑性破壊力學的解析", 日本機械學會論文集, 第55卷, 第512號, pp. 681-688.
- (14) 서창민, 강용구, 1990, "회전굽힘응력하의 탄소강재의 표면 피로균열의 성장특성" 大韓機械學會春季學術大會論文集, 第1卷, pp. 35-39.
- (15) 배원호, 김상태, 이택순, 1990, "J적분에 의한 SB41 강의 피로균열 진전 특성 평가", 大韓機械學會論文集, 第14卷, 第6號, pp. 1568-1575.
- (16) 山田民朗, 星出敏彦, 藤村哲, 眞鍋雅信, 1983, "中炭素鋼の滑材塑性疲労における表面き裂の傳ば解析に基づく壽命側の検討", 日本機械學會論文集, 第49卷, 第440號, pp.441-451.
- (17) Ramberg, W. and Osgood, W.R., 1943, "Description of Stress-Strain Curves by three Parameters", NACA, TN-902, pp. 1-46.
- (18) Tanaka, K., Hoshide, T. and Maegawa, O., 1982, "Surface Crack Propagation in Plane Bending Fatigue of Smooth Specimen of Low Carbon Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, p. 207.
- (19) Newman, Jr. J.C. and Raju, I.S., 1981, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engng. Frac. Mech., Vol. 15, No. 1-2, pp.441-451.
- (20) Shih, C.F. and Hutchinson, J.W., 1976, "Fully Plastic Solutions and Large Scale Yielding Estimates for Plane Stress Crack Problems", ASME, 1976, No. 10, pp. 289-295.
- (21) Suh, C.M., Ritchie, R.O. and Kang, Y.G., 1989, "Growth Behavior of Short Surface Fatigue Cracks in 2 1/4 Cr-1 Mo Steel", KSME Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 78-85.