

〈論 文〉

J 적분에 의한 SB41 강의 피로균열 진전 특성 평가

배원호* · 김상태** · 이택순**

(1990년 6월 4일 접수)

Description of Crack Growth Behavior of SB41 Steel in Terms of *J* Integral

W.H. Bae, S.T. Kim and T.S. Lee

Key Words: Crack Growth Rate(균열 진전 속도), Crack Opening Ratio(균열 개구 비), Effective Stress Intensity Factor Range(유효 응력 확대 계수 범위), *J* Integral Range(*J* 적분 범위), COD(균열 개구 변위), Plastic Zone Size(소성역 크기)

Abstract

Fatigue crack growth behavior was investigated in the center cracked plate of KS SB41 steel and the relation between the crack growth rate and various mechanical parameters was studied at small scale yielding, large scale yielding and full scale yielding. The crack opening ratio *U* was about 0.6~0.8 and had the larger value in the case of load control than that of strain control. Effective stress intensity factor range, ΔK_{eff} and *J* integral range, ΔJ were obtained from the notion of crack opening, and the crack growth rate was expressed with these values. The value of *J* integral range increased rapidly at stress ratio, $R=0$ in full scale yielding of load control test. COD value also increased rapidly with the increase of ligament net stress at large scale yielding of load control test.

기 호 설 명		δ	: 변위 (mm)
$2a$: 균열의 길이 (mm)	σ_{net}	: 시험편 리가멘트 부의 실단면응 (MPa)
B	: 시험편의 두께 (mm)	σ_{ys}	: 재료의 항복응력 (MPa)
$2b$: 시험편의 리가멘트 길이 (mm)		
COD	: 균열 개구 변위 (mm)		
da/dN	: 균열 진전속도 (mm/cycle)		
E	: 재료 탄성계수 (MPa)		
ΔJ	: <i>J</i> 적분 범위 (Nm/m ²)		
ΔK	: 응력 확대계수 범위 (MPa m ^{1/2})		
ΔK_{eff}	: 유효 응력 확대계수 범위 (MPa m ^{1/2})		
P	: 하중 (kN)		
W	: 시험편의 폭 (mm)		
r_p	: 소성역 크기 (m)		

1. 서 론

피로 균열재의 파괴 특성을 나타내기 위하여 히 사용되어온 역학적 량은 응력 확대 계수 범 ΔK 이었다. 선형 파괴역학의 개념으로부터 출발 응력 확대 계수 범위 ΔK 는 균열 첨단 의 소성 크기가 비교적 작은 소규모 항복 상태에서 여러 지 역학적 양들을 결정하는 데 유용하게 쓰여져 다.

응력의 값이 커지면 소성역의 크기도 커지게 며 이와 같은 탄소성 또는 전면 항복 응력의 상

*정회원, 경북산업대학 기계공학과

**정회원, 영남대학교 공과대학 정밀기계공학과

에서의 피로균열 진전은 에너지 개념과 균열 개폐 구 현상의 관점으로부터 출발한 J 적분범위, ΔJ를 사용하는 것이 보다 합리적이며 유용하다고 알려져 있다⁽¹⁾.

J 적분 범위, ΔJ는 Dowling이나 Taira(平) 등에 의하여 피로균열 진전 해석등에 사용되기 시작할 이래, 표면균열, 2축응력 상태 등에서의 피로균열 진전, 및, 크리프 피로, 중철 상태의 균열 진전에 적용되는 등 차츰 그 적용 범위가 넓어지며 중요성이 날로 증대 되고 있다^(2,3).

J 적분 범위 ΔJ가 대규모 항복응력 상태에서의 피로균열 진전 특성을 총체적으로 평가하는 척도로 사용되고 있다고 한다면, 소성역 크기, 균열개구변위 등은 국소적 역학인자로 사용되고 있다고 하겠다.

피로균열 진전 해석에 있어서 J 적분범위, ΔJ는 그 유용성에도 불구하고 아직 하중의 크기와 인장 또는 압축의 하중 형태에 따른 연구는 충분히 되어 있지 못하다. 본 연구에서는 중앙균열을 가진 SB41강의 평판이 하중제어와 변형률제어 피로 상태에서 소규모 항복, 대규모 항복, 또는 전면 항복 및 각 응력에서 피로균열 진전 속도와 J 적분 범위, ΔJ와의 관계를 조사하는 한편, 피로균열 진전 속도를 지배하는 국소적 역학 인자인 균열선단 개구 변위, COD와 균열 진전 속도와 관계 및 그 특성을 고찰하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료와 시험편

실험에 사용한 재료는 일반 구조용 강재로서 KS

Table 1 Chemical composition of SB41 steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Co	Ni	Cr	Mo
0.21	0.13	0.81	0.024	0.013	0.01	0.21	0.08	0.004

Table 2 Mechanical properties of SB41 steel

Yield strength	245MPa
Ultimate strength	461MPa
Elastic modulus	207GPa
Poisson's ratio	0.3

SB41강이며, 그 화학 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다.

시험편은 Fig. 1와 같은 두께 3mm의 중앙균열 시험편(C.C.T.)으로 제작하였으며 시험편의 폭 중심에 지름 1mm의 구멍을 뚫고 E.D.M.(Electro Discharge Machine)으로 지름 0.2mm의 와이어를 사용하여 길이 a=1.5~4.5mm의 슬릿을 넣어 실험에 사용하였다. 시험편의 표면은 600#, 800#, 1200#의 사포를 사용하여 순서대로 표면가공하고, 3/10μm, 5/100μm의 알루미나 분말을 차례대로 사용하여 시험편 표면을 경면화 하였다.

피로 시험기는 유압식 인장 압축 시험기를 사용하였으며, 피로 하중은 사인파형으로 부하하고, 하중 제어 시험에서는 응력비 R=0으로 하였으며, 변형률 제어 시험에서는 $R_e = \epsilon_{min} / \epsilon_{max}$ 라고 할 때 $R_e = 0$ 으로 하여 시험 하였다. 피로 시험 속도는 하중

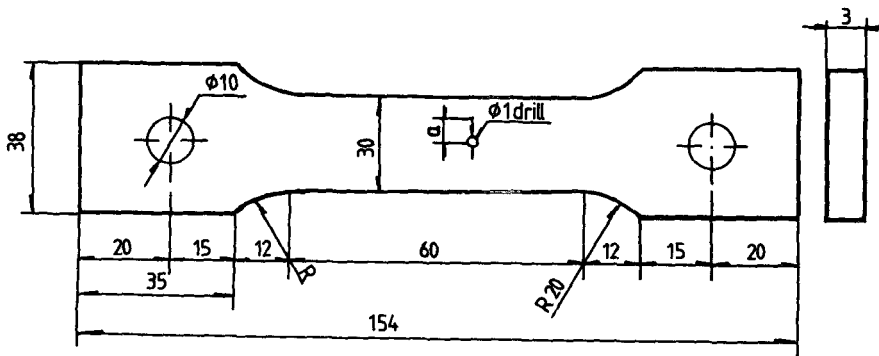


Fig. 1 Fatigue test specimen

상태에 따라 10Hz~0.8Hz의 범위로 조정하고, 그래프를 그릴 때는 0.8Hz로 떨어뜨려 그렸으며 오실로스코프에서는 일반 시험 속도에서 관찰하였다.

2.2 균열 개구의 측정

균열 개폐구의 측정은 薮川, 小林 등이 사용한 제하(除荷) 컴프라이안스 법을 사용하여 결정하였다. 균열 개폐구점을 찾기 위하여 Fig. 2와 같은 슬릿 침단 전방에 피치 3mm로 게이지 길이 2mm의 스트레인게이지를 설치하고 균열의 진전에 따라 균열 침단 전방에서 가장 가까운 스트레인 게이지에서 나오는 스트레인 출력을 사용하였다^(7,8).

균열 개폐구 점을 결정하기 위한 회로 구성도는 Fig. 3와 같다. 스트레인 게이지에서 나오는 스트레인 변화의 신호를 스트레인 증폭기로 증폭하고, 하중 상태에 따라 로드셀에서 나오는 하중 신호를 얻어 이들 신호를 감산회로(subtraction circuit)에서 증폭, 감산하여 X-Y 레코더에서 선도를 그리거나, 오실로스코프 화면에 선도가 나타나도록 하여 균열개폐구 점을 결정하였다.

2.3 균열 길이와 균열 개구변위량(COD)

균열 길이는 시험기에 설치한 정밀도 0.005mm의 이동 현미경을 사용하여 측정 하였으며, 레프리카 필름으로 균열 형태를 채취하고, 정밀도 0.5μm의 광학 현미경에서 균열 길이를 다시 측정 하여 이동 현미경으로 측정한 균열 길이의 정밀도(精密度)를 보완하였다.

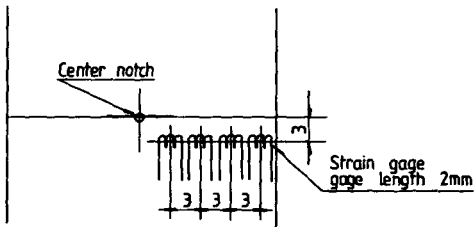


Fig. 2 Strain gage position

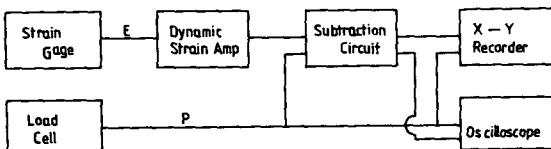


Fig. 3 Schematic diagram of crack opening measurement system

균열 개구 변위량(COD)은 균열 침단으로 부터 250μm 후방의 개구 변위량을 φ250이라 하고, 최고 하중 상태에서의 균열 형태를 레프리카 필름으로 채취하여, 역시 정밀도 0.5μm의 광학 현미경으로 균열 개구변위량을 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 균열 개구비와 유효 응력 확대계수

제하(除荷) 탄성 컴프라이안스법에 의하여 개구 하중 P_{op} 는 Fig. 4와 같이 구하였다. 그림에서 σ 는 것과 같이, 균열 개구점(crack opening point)의 하중과 균열 폐구점의 하중이 같다가 간주하

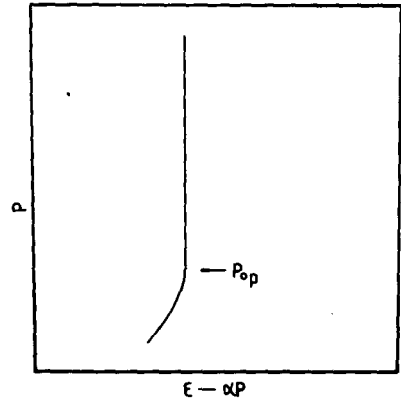


Fig. 4 Determination of crack opening point

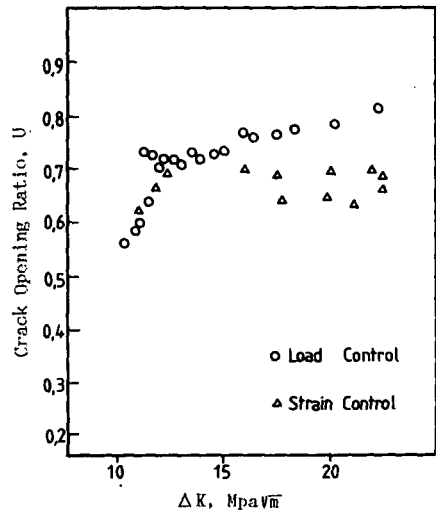


Fig. 5 Crack opening ratio

제하 곡선상에서 제하 곡선의 상부를 수직선이 되게 하였을 때 그 변곡점이 균열 폐구점이 되며 이때의 하중을 균열 개구하중 P_{op} 로 하였다. 피로 하중의 최대값을 P_{max} , 최저값을 P_{min} 이라 할 때 균열 개구비 U 는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$U = \frac{P_{max} - P_{op}}{P_{max} - P_{min}} \quad (1)$$

Fig. 5는 균열 개구비 U 와 응력 확대 계수 범위 ΔK 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 균열 개구비 U 의 값은, $U=0.6\sim 0.8$ 의 값을 가지며 응력 확대계수의 값이 증가할수록 P_{op} 의 값이 작아지고, 따라서 U 의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 변형률 제어의 경우, 개구비 U 의 값은 실단면응력이 항복점이 될때까지의 하중 제어와 거의 같은 값을 가진다. 그러나 실단면 응력이 항복응력 보다 커지면, 변형률비 $R_e = \epsilon_{min}/\epsilon_{max} = 0$ 에서 인장 과정에서 발생한 소성 스트레인으로 제하 과정에 압축력이 작용하게 되며, 이때 인장 과정에서 발생한 소성 스트레인 부분은 없어지고 균

열부의 상하 양면은 편평하게 되어 소성 스트레인이 사이클 마다 누적되는 하중제어 시험 때보다 낮은 균열 개구비를 나타낸다. 따라서 균열 개구비는 균열 길이와 응력의 크기에 영향 받을 뿐 아니라 소성 스트레인이 발생하는 경우, 사이클 마다 누적되는 전체 소성 스트레인의 양에도 영향을 받는다고 하겠다.

Fig. 6는 균열 진전 속도와 응력 확대계수 범위의 관계를 나타낸 것이다. 이때 응력 확대계수 범위는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2)$$

여기서 K_{max} 는 최대 피로 하중 상태의 응력 확대계수의 값이며, K_{min} 는 최소 하중의 응력 확대계수의 값이다. 하중이 負(-)의 값이 될때는 응력 확대계수의 값도 負의 값이되어 의미가 없으므로 이때는 $K_{min}=0$ 으로 하였다^(9,10).

ΔK 의 값은 식 (3)과 같은 세컨트 공식에 의하여 구하였다^(10,11).

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi \cdot a \cdot \sec(\pi \cdot a/W)} \quad (3)$$

단 $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ 이다.

여기서 σ 는 총응력(gross stress)이며 이때 균열 진전 속도와 응력 확대계수 범위의 관계는 식 (4)과 같이 주어진다.

$$da/dN = 0.205E^{-9} \Delta K^{4.17} \quad (4)$$

피로 균열 진전속도의 시험 방법에 관한 ASTM 규정은 중앙 시험편의 경우 식 (5)와 같이 규정하고 있다⁽¹⁰⁾.

$$W - 2a \geq 1.25 P_{max} / (B\sigma_{ys}) \quad (5)$$

이것은 실단면 응력이 $\sigma_{net} \leq (1/1.25)\sigma_{ys}$ 일 때만 유용한 자료로 인정하도록 규정한 것이라고 하겠다.

일반적으로 선형 파괴역학이 적용될 수 있는 소규모 항복의 범위는 1축 하중의 경우 식 (6)과 같다⁽¹²⁾.

$$a, b \geq 2.5 (K_I / \sigma_{ys})^2 \quad (6)$$

반복 하중이 작용하는 경우의 소규모 항복의 범위에 대하여는 명확히 정의되어 있지 않으나 식 (6)에 K_I 대신에 K_{max} 를 대입하여 식 (7)을 얻는다.

$$a, b \leq 2.5 (K_{max} / \sigma_{ys})^2 \quad (7)$$

Fig. 6에 소규모 항복의 범위를 표시하였으며 하중 제어 피로시험의 경우 피로균열 진전 과정의 초기 단계에서만 선형 파괴역학이 적용될 수 있다고 하겠다.

일반적으로 피로 균열 진전에 있어서는 균열 개구와 폐구 현상을 수반하며 균열 개구비를 U 라고

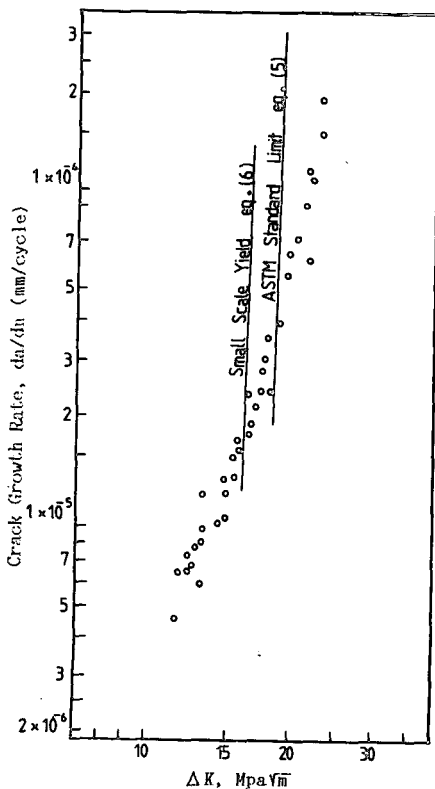


Fig. 6 Relation between da/dN and ΔK

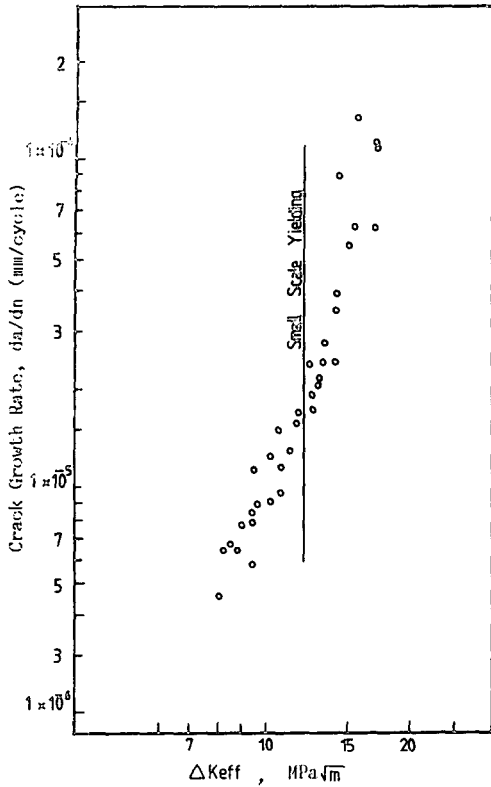


Fig. 7 Relation between da/dN and ΔK_{eff}

할 때 유효 응력 확대계수와와의 관계는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\Delta K_{eff} = U \Delta K \quad (8)$$

Fig. 7은 균열 진전 속도와 유효 응력 확대계수 범위의 관계를 나타낸 것이며 관계식은 (9)과 같다.

$$da/dN = 0.46E - 9 \Delta K_{eff}^{3.38} \quad (9)$$

식 (4)와 식 (9)는 ASTM 규정이 허용하는 자료만을 대상으로 하여 구한 식이다.

3.2 균열 진전의 J 적분에 의한 평가

J적분에 의한 피로균열 진전 평가는 소규모 항복의 경우 뿐만 아니라 대규모 항복 또는 전면 항복의 경우에도 가능하다는 장점을 가지고 있다. 피로 하중 상태에서 J적분범위 ΔJ 는 하중 변위 곡선이 Fig. 8과 같이 주어질때 히스테리시스 곡선으로 둘러 싸여진 면적에 상응하는 에너지 S를 구하고 그것으로부터 식 (10)과 같이 계산할 수 있다⁽¹³⁾.

$$\Delta J = \frac{(\Delta K_{eff})^2}{E} + \frac{S}{B(W-2a)} \quad (10)$$

피로 하중이 재료의 탄성 한도 이하로 작용 할

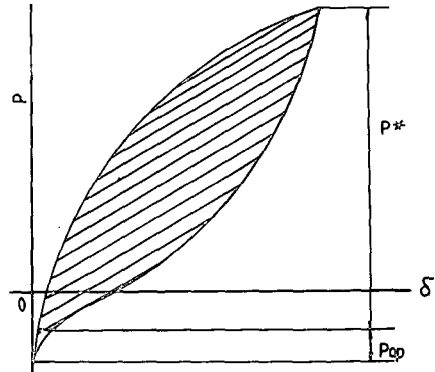


Fig. 8 Cyclic stress strain curve of center cracked plate

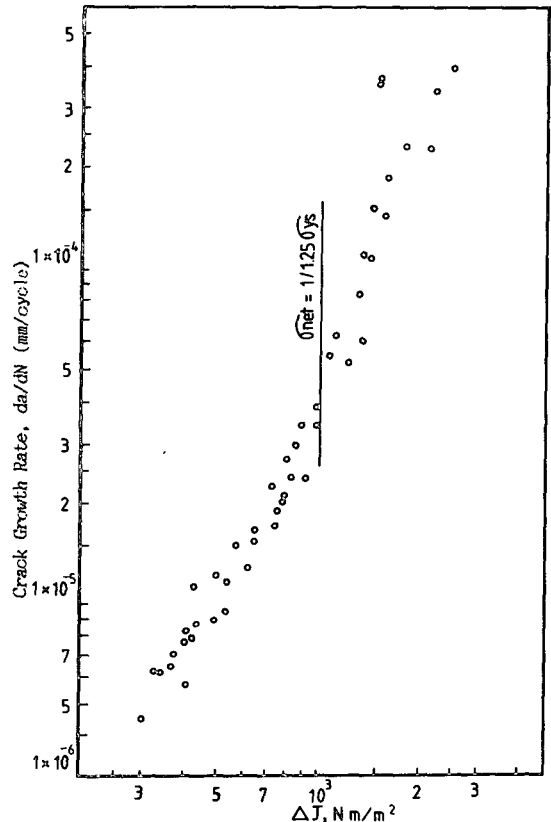


Fig. 9 Relation between da/dN and ΔJ

경우 면적 S의 크기는 무시할 수 있을 정도로 작아져서 이때 J적분 범위의 값은 식 (11)과 같이 된다.

$$\Delta J = (\Delta K_{eff})^2 / E \quad (11)$$

Fig. 9는 균열 진전 속도와 J적분 범위의 관계를

나타낸 것이며 그 관계 식은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$da/dN = 0.626E - 10AJ^{1.95} \quad (12)$$

Fig. 10은 하중이나 균열 길이가 커져서 실단면 응력이 비교적 크게 작용 할 경우, 각각 하중 제어와 변형률 제어 피로 시험의 균열진전 속도와 J적분 범위의 관계를 나타낸 것이다. 변형률 제어의 경우 J 적분범위의 값이 증가하는데 따라 일반적으로 균열 진전 속도는 항복응력 이하의 균열 진전 속도와 거의 같은 경향을 가지며 증가하고 있으나, 하중제어의 경우는 크게 증가하지 않고 있다. 이것은 하중제어의 경우, 균열 길이가 길어지는데 대하여 하중의 값은 일정하므로 균열 길이의 증가와 더불어 J적분 범위의 값은 증가하며, 소성 변형으로 인한 균열 첨단의 둔화는 J적분 범위의 값이 급속히 증가하는데도 불구하고 균열 진전 속도를 크게 증가시키지 않는 것으로 판단된다.

변형률제어의 경우는 균열길이의 증가와 더불어,

최대 하중이 점감하므로 J적분 범위의 값은 크게 증가하지 않는다. 또 변형률 제어의 경우, J적분 범위의 값이 커지면 균열 진전 속도는 급속히 증가하는데 이것은 하부 응력 이상의 응력이 작용하는 변형률 제어의 경우, 제하 과정에서 압축 응력이 발생하므로 그 압축 하중의 영향이 작용한 것으로 판단된다.

3.3 균열개구변위와 균열진전속도의 관계

일정한 판폭을 가진 판재에서 균열이 진전하게 되면 하중은 일정하더라도 리가멘트 부분의 실단면 응력은 증가하게 된다. 이때 실단면 응력의 값이 항복응력의 값보다 커지면 리가멘트의 전체 단면이 소성변형하게 되고 인장 피로의 경우, 이 소성 변형은 누적되고 균열 첨단에서의 개구 변위도 증가한다.

최대하중에서 균열 첨단으로부터 250 μ m 後方에서 떨어진 위치의 균열 개구 변위와 최소하중에서

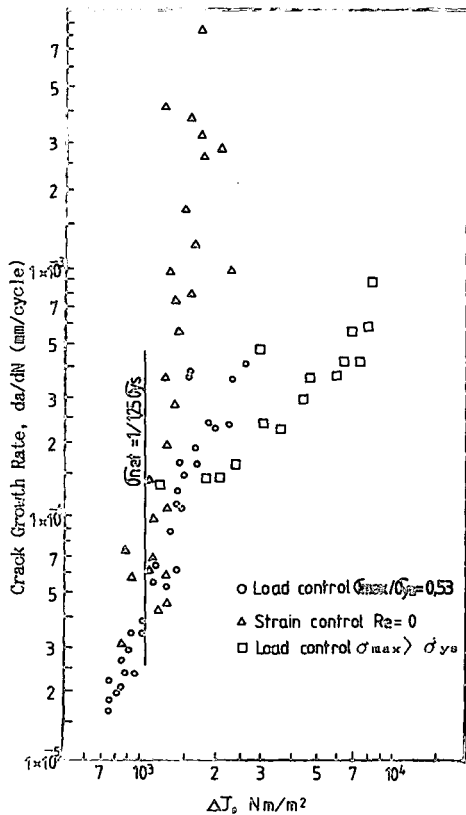


Fig. 10 Relation between da/dN and ΔJ

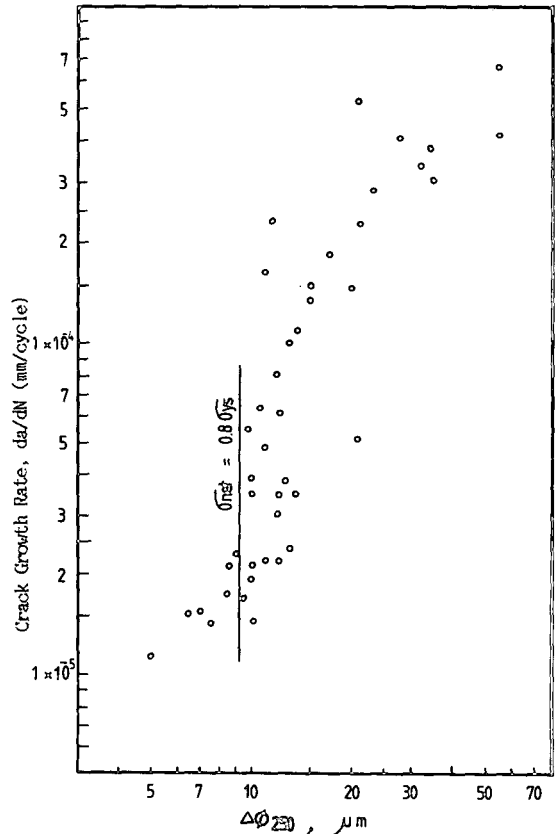


Fig. 11 Relation between da/dN and COD

의 균열 개구변위의 변동범위를 $\Delta\phi_{250}$ 이라고 할 때 Fig. 11은 균열 진전 속도와 균열 개구변위 $\Delta\phi_{250}$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 실단면 응력의 값이 항복 응력의 값과 거의 같게 되면 개구변위는 급증하게 되는 것을 알 수 있다. 식 (13)은 균열 개구변위와 균열 진전 속도의 관계를 나타낸 식이다.

$$da/dN = 0.129E - 5\Delta\phi_{250}^{1.42} \quad (13)$$

이와 같이 균열 진전 속도를 균열 개구변위와 관련지어 평가할 때, 균열 개구변위는 소성 스트레인의 영향이 매우 크므로 부하 하중 상태를 충분히 고려하여 평가하여야 할 것이다.

4. 고 찰

앞 장에서 소규모 항복으로 부터 대규모항복, 전면 항복 상태의 피로 균열 진전 속도와 여러 가지 역학량들과 관련하여 그 특성은, 피로균열 진전 속도는 균열 첨단의 소성역 크기와 밀접한 관계를 가지며 소성 스트레인의누적 량과도 관계를 가진다는 것이다. 단순 인장의 경우, 평면응력 상태에서 소성역의 크기는 탄성해석에 따르면 식 (14)와 같이 주어지며

$$\gamma_p = \frac{1}{\pi} \left[\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (14)$$

평면 변형 상태에 대하여는 식 (15)와 같이 주어진다.

$$\gamma_p = \frac{2}{5.6\pi} \left[\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (15)$$

한편 반복 하중이 작용하는 경우에는 최대소성역 내에 반복 소성역이 존재하고 반복 소성역 크기는 식 (16)과 같이 주어진다⁽¹⁴⁾.

$$\gamma_p = \frac{2}{5.6\pi} \left[\frac{K_I}{2\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (16)$$

피로 균열 진전 속도 시험법에 관한 ASTM 규정에 의하면 콤팩트시험편(CT)의 경우 식 (17)과 같이 규정하고 있다.

$$b \geq \frac{4}{\pi} \left[\frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (17)$$

식 (17)은 식 (14)에 의한 평면 응력 상태에서 리가멘트 b의 1/4이 되는 소성역의 크기까지를 선형 파괴역학(LEFM)이 적용될 수 있는 범위로 정하고 있는 것이다⁽¹⁵⁾.

중앙균열 시험편(CCT)에 대하여는 식 (6)과 같이 규정하고 있다. 식 (6)을 변형하면 실단면 응력

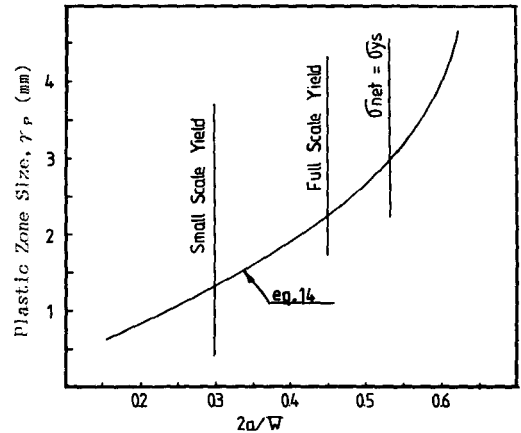


Fig. 12 Plastic zone size at $\sigma/\sigma_{ys}=0.53$

$\sigma_{net} \leq (1/1.25)\sigma_{ys}$ 의 관계를 얻는다. 이것은 실단면 응력이 항복응력의 0.8배까지를 유용한 자료로 규정하는 것과 같으므로 중앙 균열시험편의 경우, 소성역의 크기로 선형 파괴역학이 적용될 수 있는 범위를 정하였다기 보다는 실단면 응력의 크기와 항복 응력을 관련지어 표현한 것이라고 하겠다.

Fig. 12는 식 (14)에 의한 소성역 크기와 균열길이 $2a/W$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 응력비 $\sigma_{max}/\sigma_{ys}=0.53$ 의 경우, 선형 파괴역학이 적용될 수 있는 범위는 약 $2a/W=0.5$ 정도까지의 값이며 또 이때 식 (14)에 의한 이론적 소성역의 크기는 2.7mm정도가 된다.

5. 결 론

SB41강판 중앙균열재의 하중제어와 변형률제어 상태에서의 피로균열 진전 속도와 J 적분범위, COD 등 역학량과의 관계를 각 응력의 단계에 따라, 소규모 항복, 대규모 항복 및 전면 항복 상태에서 조사하고 각 응력 상태에 따른 피로균열 진전 특성을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개구비 U 는 0.6~0.8의 값을 가지며, 실단면 응력이 커지면 하중 제어의 경우는 소성 스트레인의 영향으로 변형률제어 시험에서 보다 일반적으로 더 큰 개구비 값을 가진다.

(2) 균열 진전 속도와 응력 확대계수 범위 또는 유효응력 확대계수 값 이하의 경우에만 적용하여 다음과 같이 주어진다.

$$da/dN = 0.205 E - 9\Delta K^{4.17}$$

$$da/dN = 0.464 E - 8\Delta K_{eff}^{3.58}$$

(3) J적분 범위는 선형 파괴역학의 적용 범위를 벗어난 대규모 항복 또는 전면 항복 상태의 피로균열 진전 해석에 유용하며, 균열 진전 속도와 J적분범위의 관계는 다음과 같다.

$$da/dN = 0.626 E - 10\Delta J^{1.95}$$

균열 길이가 증가하면 하중 제어 시험에서 J적분범위의 값은 크게 증가하는 경향을 가지나 변형을 제어의 경우는 최대하중의 이하로 그 값은 크게 증가하지 않는다.

(4) 개구면위 COD는 대규모 항복 상태의 균열 진전 해석에 유용하게 사용될 수 있으나 하중의 성질에 크게 영향 받으며 하중 제어에서 응력비 $R=0$ 일 때 균열 진전 속도와 관계식은 아래와 같다.

$$da/dN = 0.129 E - 5\Delta\phi_{250}^{1.42}$$

참 고 문 헌

- (1) Tanaka, K., Hosida, T., Nakada, M., 1983, "Elastic Plastic Crack Propagation under High Cyclic Stress", ASTM STP 803, II, pp.708~722.
- (2) Dowling, N.E. and Begly, J.A., 1976, "Fatigue Crack Growth during Gross Plasticity and the J Integral", ASTM STP 590, pp.82~103.
- (3) Dowling, N.E., 1976, "Geometry Effects and the J Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth", ASTM STP 601, pp.19~32.
- (4) 平修二, 田中啓介, 小川茂, 1977, "彈塑性および全面降伏條件下で "の疲労き裂傳ば則", 材料, 第26卷, 第280號, pp.93~98.
- (5) Tanaka, K., Hosida, T, and Maekawa, O., 1982, "Surface Crack Propagation in Plain Bending Fatigue of Smooth Specimen of Low Carbon Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, pp.207~220.
- (6) 平修二, 大谷隆一, 北村隆行, 山田勝彦, 1979, "クリープ疲労重疊下の裂田ばに關するJ積分による検討", 材料, 第28卷, 第308號, pp.414~420.
- (7) 小川武史, 小林英男, 戸梶恵郎, 1985, "ΔK漸増試験における疲労き裂進展および下限界特性評價", 日本機械學會論文集, 第51卷, 第472號, pp.2771~2776.
- (8) 菊川眞, 城野政弘, 田中建一, 高谷勝, 1975, "除荷彈性コンプライアンス法低進展速度領域における疲労き裂進展速度とき裂開開口舉動の測定", 材料, 第25卷, 第276號, pp.899~903.
- (9) Fuchs, H.O., Stephens, R. I., 1980, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons inc, New York, pp.82.
- (10) ASTM Standards, 1986, "Standard Test Method for Constant Amplitude Fatigue Crack Growth", Designation : E 647~86.
- (11) Feddersen, C.E, 1966, "Discussion in Plane Strain Crack Toughness Testing of Metallic Materials", ASTM STP 410, pp.77~79.
- (12) 小林 英男, 中澤一, 外 1 人, 1980, "疲労き裂進展の彈塑性破壊力學における評價", 材料, 第29卷, 第325號 pp.1049~1055.
- (13) Liaw, P.K., 1985, "Some Comments on Hysteretic Plastic Work ADN Cyclic J-Integral Associated with Fatigue Cracking", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 2, pp.237~245.
- (14) 小林 英男 外 5 人, 1977, "引張り豫加工た與之た低炭素鋼板の疲労き裂進展舉動", 日本機械學會論文集, 第43卷, 第366號, pp.416~425.
- (15) James, L.A., 1981, "Specimen Size Considerations in Fatigue Crack Growth Rate Testing", ASTM STP 738, pp.45~57.