

단일 및 혼합모드하에서 304스테인리스강의 피로균열 진전속도와 방향특성

권종완*, 양현태⁺

(논문접수일 2001. 3. 14, 심사완료일 2002. 4. 23)

Fatigue Crack Growth Rates and Directions in STS304 under Mode I and Mixed Mode

Jong-Wan Kwon*, Hyun-Tae Yang⁺

Abstract

The fatigue crack growth under mixed mode condition has been discussed within the scope of linear fracture mechanics such as maximum tangential stress, maximum tangential principal stress and minimum strain energy density. The purpose of this study is to investigate the characteristics of fatigue crack growth in 304 stainless steel under mixed mode. The fatigue test results carried out by using inclined pre-crack specimens was compared to both of the theoretical predictions of the criteria, maximum tangential stress and strain energy density. As difference from theoretical analysis, the transition region from mixed mode to mode I appeared in the fatigue test. There is deep relationship between the angle of slanted pre-crack and transition. Therefore, as applying the different stress intensity factor to each mode I+II and mode I, the directions and rates of fatigue crack growth are evaluated more accurately under mixed mode.

Key Words : Mixed Mode(혼합모드), Fatigue Crack Growth(피로균열성장), Maximum Tangential Stress Theory(최대원주응력이론), Minimum Strain Energy Density(최소변형률 에너지 밀도), Transition Angle of Crack(균열 천이각도)

1. 서론

원자력, 화력 발전설비 및 화학플랜트와 같은 대형 플랜트의 압력용기, 보일러 및 배관과 같은 주요기기는 운전연

한이 증가함에 따라 기기에 가해지는 고응력 및 피로 등의 하중과 열, 부식 및 침식과 같은 환경에 의한 영향이 산업의 발달로 인하여 더욱 가혹해지고 있는 실정이며, 이로 인한 국내·외에서 기기나 구조물의 파괴로 많은 인명과 재

* 주저자, 경일대학교 기계공학부 (jkwon@bear.kyungil.ac.kr)
주소: 712-401 경북 경산시 하양읍 부호리 33번지, Tel: 053-850-7123
⁺ 경일대학교 기계기술연구소

산 피해를 겪고 있다. 파괴의 형태 중, 반복하중상태에서 손상누적 또는 균열진전으로 인한 피로파괴는 파괴형태의 약 70%이상을 차지하고 있으므로, 피로에 대한 연구는 오래전 부터 상당히 중요시되어 왔다.

균열이 존재하는 기기나 구조물에 다축응력이 작용하는 경우, 파괴역학에서는 모드 I, II, III로 분류하여 균열선 단에서의 응력상태를 각각 정의하고 있다. 세 가지 모드는 균열을 가진 구조물에 복합적으로 작용하고 있으나, 일반적으로 균열전파에 지배적인 영향을 차지하며, 또한 혼합모드 상태에서도 균열의 전파가 모드 I 이 되는 방향으로 진행하려는 경향이 있어, 파괴역학에서는 주로 모드 I 에 대한 연구가 집중되어 왔다.

모드 I 에 대한 피로균열진전 특성에 대한 연구의 성과로 구조물에 기하학적 장애물을 설치하여 균열진전을 억제하는 설계방법이 개발되어 각종 플랜트 및 항공기 구조물 등에 적용되고 있다. 이러한 경우, 균열은 모드 I 대신 모드 II, III 또는 혼합모드⁽¹⁾상태로 진전하게 되므로, 최근 들어 모드II, III 및 두가지 이상의 모드가 혼합된 혼합모드에 대한 파괴역학적 연구가 절실히 요구되고 있다^(2,3).

본 연구에서는 304스테인리스강을 대상으로, 최대 원주 응력 및 변형률 에너지 밀도를 이용하여 균열진전속도 및 방향을 예측하고, 피로시험을 수행한 결과를 비교 분석함으로써, 혼합모드(모드 I + II)조건에서의 피로균열 발생 및 성장특성을 규명하였다. 본 연구결과는 대형 구조물의 파괴역학적 안전설계와 수명예측의 기초자료로 제시될 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

Erdogan과 Sih는 혼합모드에서의 파괴조건은 균열성장이 원주방향의 최대인장응력과 직각인 방향으로 일어난다는 최대원주응력(Maximum Tan-gential Stress, MTS)⁽⁴⁾ 파괴조건을 제시하였다. Fig. 1과 같이 길이 2a의 균열을 가진 무한평판에 등분포하중이 작용할 경우, β 만큼 경사진 균열선단에서의 원주방향응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{3}{4} \cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\frac{3}{4} \sin \frac{\theta}{2} - \frac{3}{4} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (1)$$

이때, 원주응력(σ_{θ})이 최대가 되기 위해서는 다음 조건

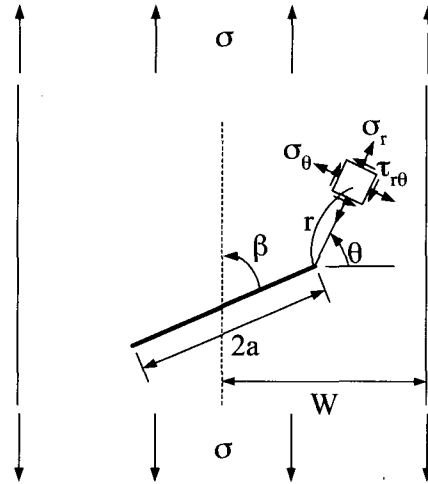


Fig. 1 Polar stress components in an element around a crack tip

을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있고,

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} = K_I \sin \theta + K_{II}(3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (3)$$

MTS조건을 고려한 균열진전 방향 θ_c 는 위 식을 만족하는 조건에서 다음식으로 예측할 수 있다.

$$\theta_c = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\alpha}{4} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\alpha^2 + 8} \right) \quad (4)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{K_I}{K_{II}} \quad (5)$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sin^2 \beta \cdot f_I(a/W) \quad (6)$$

$$K_{II} = \sigma \sqrt{\pi a} \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot f_{II}(a/W)$$

식 (6)에서 무한평판의 경우 f_I, f_{II} 는 각각 1이다. 유한판재에 대한 Fedderson의 수정계수를 적용하면 f_I, f_{II} 는 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

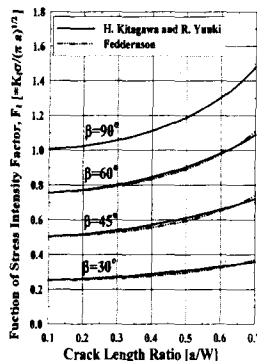


Fig. 2 K_I for a central slanted crack

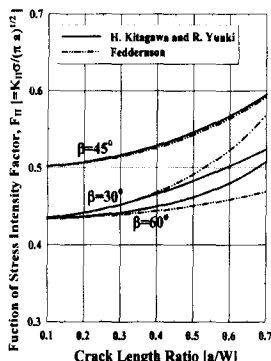


Fig. 3 K_{II} for a central slanted crack

$$f_I(a/W) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \quad (7)$$

$$f_{II}(a/W) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W} \cos \beta\right)}$$

Kitagawa⁽⁵⁾ 등의 해석결과와 식 (6)과 식 (7)을 이용한 해석결과를 Fig. 2, 3에 비교하였다.

Fig. 2에서 형상함수 F_I 는 균열길이비(a/W)에 따라 차이를 보이지 않지만, Fig. 3에서 형상함수 F_{II} 의 결과는 균

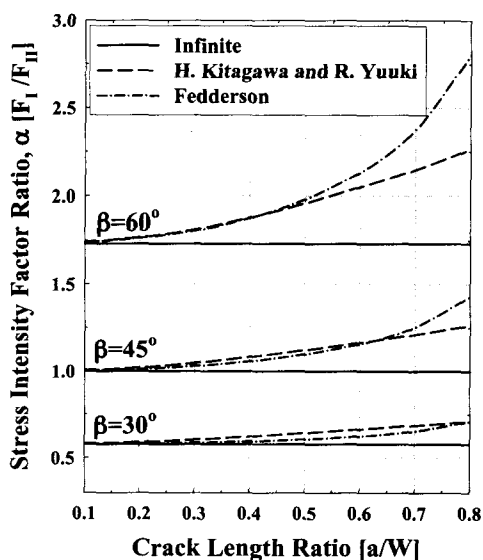


Fig. 4 Stress intensity factor ratio versus crack length ratio

열길이비가 0.4 이상이 되면 큰 차이를 보이고 있다.

식 (5)에 나타난 응력확대계수비 α 는 식(6)을 적용하면 무한평판($\alpha_{infinite}$) 및 유한평판(α_{finite})에 대하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

무한평판 :

$$\alpha_{infinite} = \frac{K_I}{K_{II}} = \tan \beta$$

유한평판 :

$$\alpha_{finite} = \frac{K_I}{K_{II}} = \tan \beta \sqrt{\frac{\cos\left(\frac{\pi a}{2W} \cos \beta\right)}{\cos\left(\frac{\pi a}{2W}\right)}} \quad (8)$$

균열길이비의 변화에 따른 $\alpha_{infinite}$ 와 α_{finite} 의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 Kitagawa 등의 해석결과와 본 연구의 해석결과가 균열길이비 0.5 이하에서는 아주 잘 일치하였다. 따라서, 본 연구에서 이용한 Feddersen의 수정계수는 균열진전 방향을 예측하기에 적합하다고 판단된다.

변형률에너지밀도(Strain energy density, SED)⁽⁶⁾는 최소 변형률에너지밀도 방향으로 균열성장이 일어난다는 것이다.

SED와 응력확대계수와의 관계는 다음과 같다.

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2 \quad (9)$$

여기서, K_I , K_{II} 은 식 (6)과 같고,

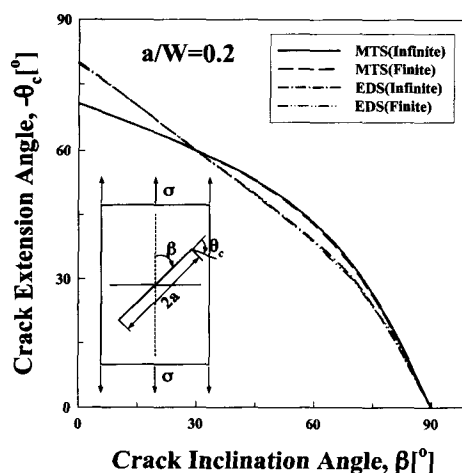


Fig. 5 Variation of the crack extension angle versus the crack inclination angle

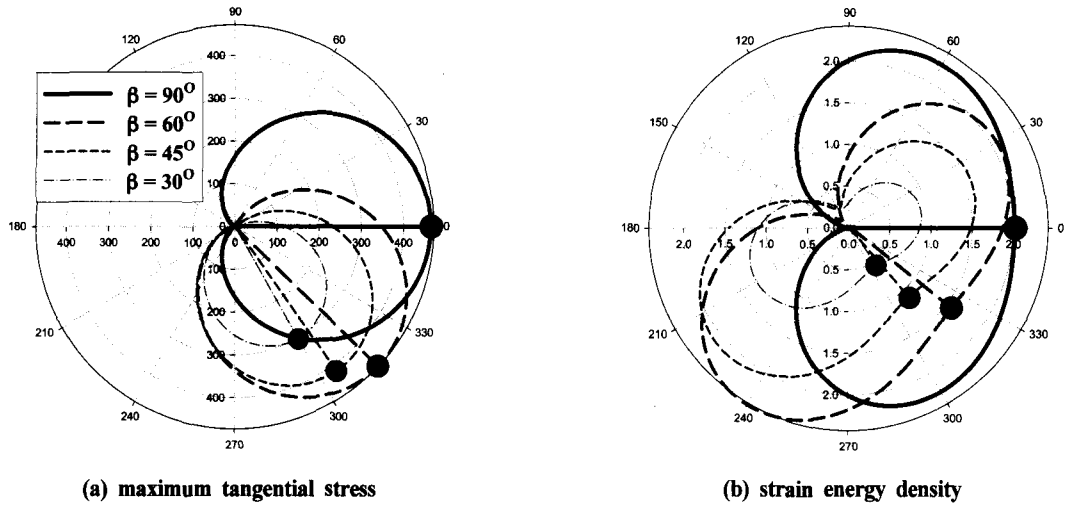


Fig. 6 Direction of initial crack extension according to the criteria

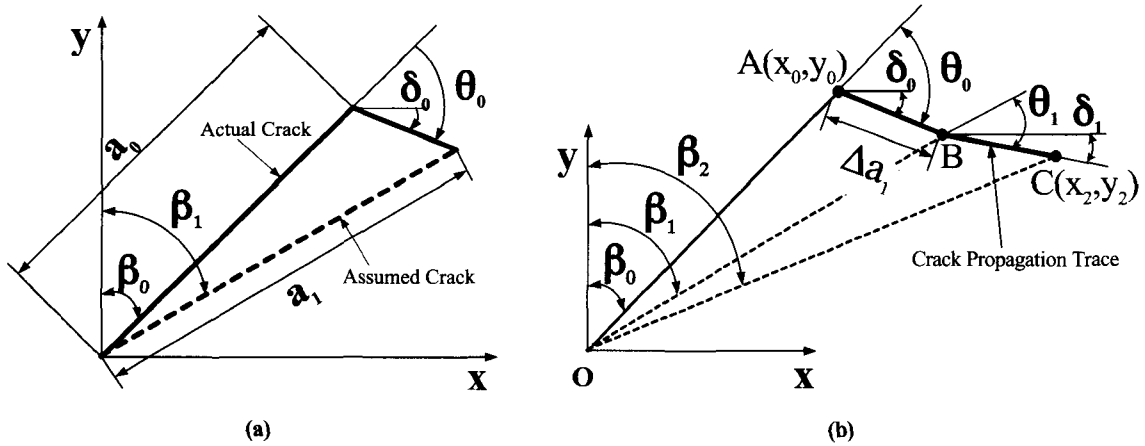


Fig. 7 Schematic for prediction of crack growth

$$a_{11} = (1 + \cos \theta)(x - \cos \theta) / 16 \mu$$

$$a_{12} = \sin \theta [2 \cos \theta - (x - 1)] / 16 \mu$$

$$a_{22} = (x + 1)(1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta)(3 \cos \theta - 1) / 16 \mu$$

이다. 평면응력상태일 때 $x = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ 이다.

균열진전은 식 (9)에서 최소의 S방향으로 일어나므로, 균열진전방향(θ_c)은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_c} = 0, \quad \frac{\partial^2 S}{\partial \theta_c^2} > 0 \quad (10)$$

무한평판의 경우 식(10)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial S}{\partial \theta_c} = (2 \cos \theta + \eta) \sin \theta K_I^2 + 2(\cos 2\theta + \eta \cos \theta) K_I K_{II} - (6 \cos \theta + \eta) \sin \theta K_{II}^2 \quad (11)$$

여기서, $\eta = 1 - x$ 이다.

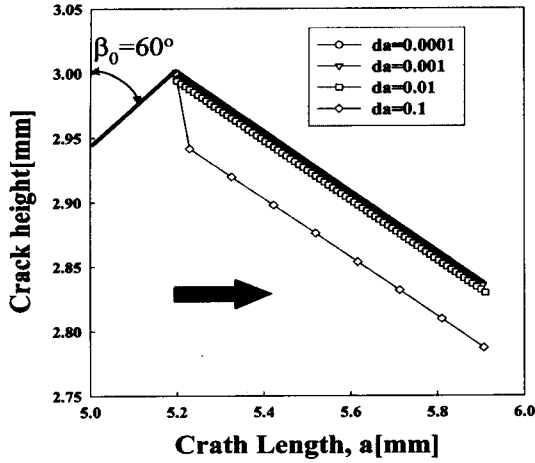


Fig. 8 Variation of the crack path for different crack increment

식 (4)와 식 (11)을 이용하여 무한평판과 유한평판에서의 균열진전 방향의 예측결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. MTS 및 SED 파괴조건으로 해석한 경우, 균열진전 방향은 균열 각도(β)에 상관없이 유한과 무한평판이 같은 결과를 보였다. MTS와 SED의 결과는 현저한 차이를 보이고 있다.

Sih와 Barthlemy⁽⁷⁾는 7075 Al 합금과 Ti-6Al-4V 합금을 이용하여 균열증분에 따른 균열진전을 최소 변형을 에너지 밀도로서 예측하여 실험결과와 비교하였다.

Fig. 7은 Sih 등이 균열증분에 따른 피로균열 진전방향 예측에 이용한 개략도이다. 균열진전방향을 예측하기 위하여, 초기균열각(β_0)을 식(4), (11)에 적용하여 균열진전각 θ_0 를 구하고, 균열증분(Δa)에 임의의 값을 적용하여, B점의 좌표값을 얻는다. 선분 \overline{OB} 를 균열로 가정하고, 가상 균열각 β_1 을 식(4), (11)에 적용하여 θ_1 을 구하고, 균열증분(Δa)에 임의의 값을 적용하여, C점의 좌표 값을 얻는다. 이 과정을 반복하여 균열진전경로를 구하였다.

Sih 등의 연구에서 균열진전방향을 예측하기 위한 균열증분은 $\Delta a \ll 1$ 조건을 만족해야 한다. 균열증분(Δa)의 변화에 따른 균열진전방향을 예측경로 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이 Sih의 제안된 식은 Δa 가 최소한 0.001mm이하가 되어야만 정확한 경로추적이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

본 연구에서는 균열진전경로를 효율적으로 해석하기 위하여, 식 (12)를 이용하였다.

$$\beta_i = \tan^{-1}\left(\frac{x_i}{y_i}\right), \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$$\delta_i = |\theta_i| - (90^\circ - \beta_i)$$

$$x_{i+1} = x_i + \Delta a \cdot \cos \delta_i$$

$$y_{i+1} = y_i - \Delta a \cdot \sin \delta_i \tag{12}$$

$$a_{i+1} = \sqrt{x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2}$$

3. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 각종 발전소 및 화학플랜트와 같은 대형구조물에 약 70%이상을 차지하는 배관 및 저장탱크의 재료로 사용되고 있는 304 스테인리스강을 이용하였다. 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시편의 형상은 Fig. 9와 같이 두께가 4mm이고, 폭이 50mm인 중앙 경사 균열 피로시편이다.

피로시험은 25Ton 용량의 유압 서보 피로시험기(Instron 8516)를 이용하였다. 피로시험 조건은 Table 2와 같다. 균열선단의 하중상태는 초기 노치의 경사각도를 변화시킴으로써 모드 I ($\beta_0=90^\circ$)과 혼합모드($\beta_0 = 30, 45, 60^\circ$)의 상태가 되도록 하였다.

시험편 중앙의 초기노치는 직경 1mm 드릴가공 후, 방전가공 하였다. 피로균열진전 시험시 균열의 길이와 높이는 100배율의 이동식 현미경을 이용하여 그 변화를 측정하였다.

Table 1 Mechanical Properties of STS304

| | |
|------------------|----------|
| Yield Strength | 319[MPa] |
| Tensile Strength | 751[MPa] |
| Elongation | 62.2[%] |

Table 2 Fatigue test conditions

| σ_{Max} | σ_{Min} | Freq. | Stress Ratio | Control Mode | Wave Form |
|----------------|----------------|-------|--------------|--------------|-----------|
| 127.4 | 12.7 | 10 | 0.1 | Load | Sine |

4. 결과

최대원주응력과 최소변형률에너지밀도 조건을 바탕으로 피로균열진전 방향을 예측한 결과와 실험결과를 Fig. 10, 11, 12에 각각 나타내었다.

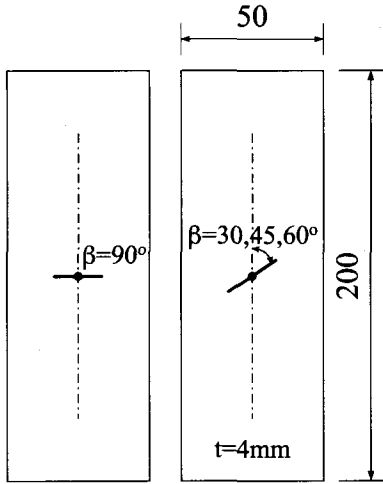


Fig. 9 Geometry of specimen

$\beta_0 = 60^\circ$ 에 대하여 Fig. 10에 나타난 것처럼, 무한판재에서의 최대원주응력 ($MTS_{Infinite}$)과 유한판재에서의 최대 원주응력 (MTS_{Finite})의 예측이 거의 같은 결과를 보이고 있었으며, $\beta_0 = 30^\circ$ 에 대하여 Fig. 12에 나타난 것처럼, $MTS_{Infinite}$ 예측과 무한판재에서의 변형률에너지 밀도 ($SED_{Infinite}$)에 대한 예측 결과가 일치하였다.

초기균열 각 $\beta = 30, 45, 60^\circ$ 에서 이론적인 예측결과와 실험결과가 균열진전 전반부에서는 잘 일치하였으나, 균열의 길이가 증가할수록 예측결과와 실험결과에는 현저한 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 Fig. 7 (a)에서 가정한 가상균열길이 및 각도에서 기인된 것으로 사료된다.

Fig. 10~12에서 균열이 진전함에 따라 여러 가지 예측결과와 실험결과는 초기균열높이의 약 83~86% 지점(A지점)에서부터 차이를 보이기 시작하였고, 그 이후의 균열은 하중방향에 대하여 거의 직각방향으로 진전(모드 I)하였다.

Fig. 10~12에서 혼합모드에서 모드 I으로 천이하는 영역(A지점)은 초기균열각도가 60, 45, 30°인 경우 각각 균열중심으로부터 15, 22.5, 30° 정도의 각도를 이루는 지점이며, 이러한 천이각도는 초기균열각도와 밀접한 관계가 있다. 이것은 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{90 - \beta_0}{2} \quad (\beta_0 = 30, 45, 60^\circ) \quad (13)$$

여기서, η 는 천이각도, β_0 는 초기균열각도이다.

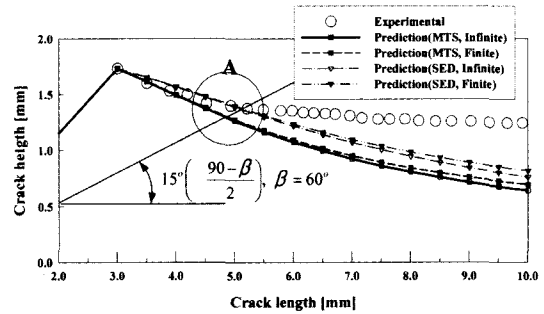


Fig. 10 Fatigue crack propagation for $\beta = 60^\circ$

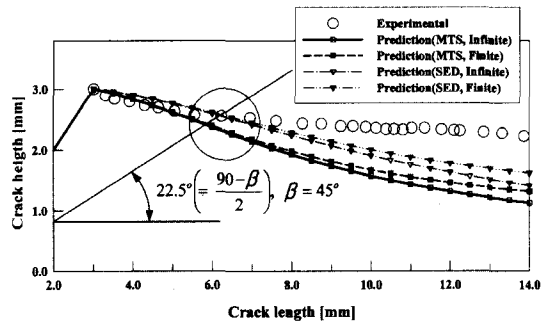


Fig. 11 Fatigue crack propagation for $\beta = 45^\circ$

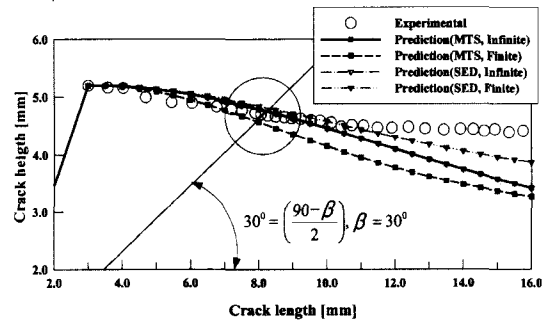


Fig. 12 Fatigue crack propagation for $\beta = 30^\circ$

경사진 균열의 진전은 초기에는 혼합모드(모드I+II)의 영향을 받으나, 천이각도 이상, 즉 천이영역 이후에는 모드 I에 의한 영향이 지배적으로 작용하고 있다.

그러므로, MTS 및 SED를 이용한 이론적 균열진전 방향 예측은 천이영역이전에서만 적용할 수 있음을 알 수 있다.

피로시험 결과를 식 (6)으로써 구한 응력확대계수범위와 균열성장속도를 Fig. 13, 14, 15 (a)에 각각 나타내었다.

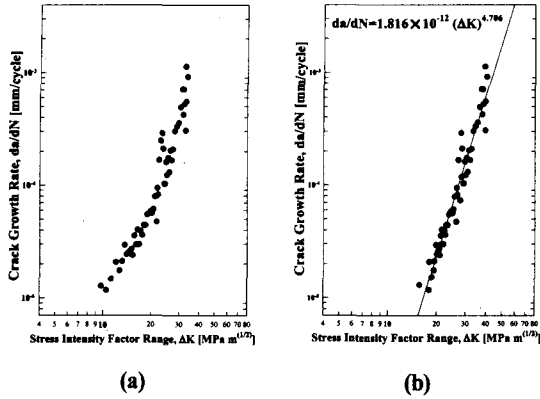


Fig. 13 $da/dN - \Delta K$ for $\beta_0=60^\circ$

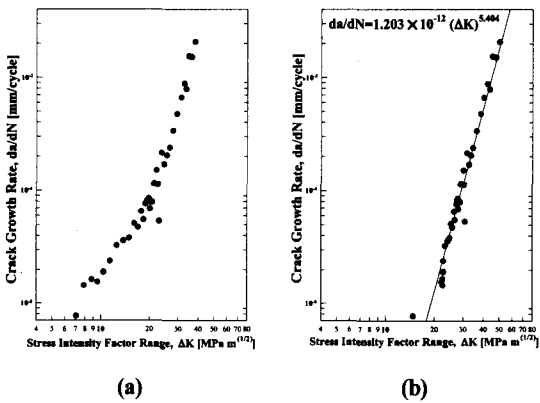


Fig. 14 $da/dN - \Delta K$ for $\beta_0=45^\circ$

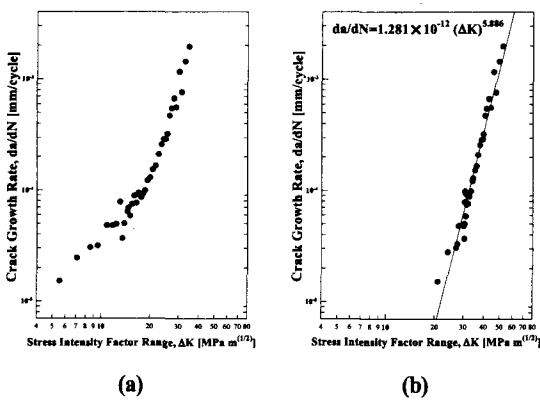


Fig. 15 $da/dN - \Delta K$ for $\beta_0=30^\circ$

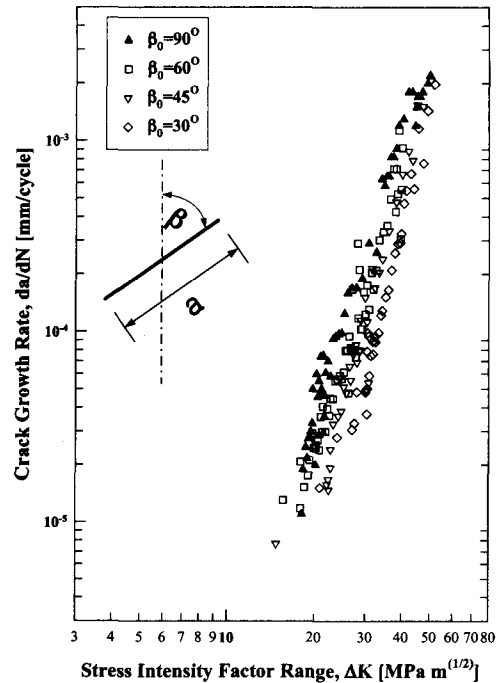


Fig. 16 $da/dN - \Delta K$ under Mode I and Mode II

Fig. 13~15 (a)에서 시험결과는 Paris 이론을 만족하는 선형성을 보이지 않는다. 이것은 혼합모드에서 모드 I으로 균열성장이 천이됨으로써 나타나는 현상이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 균열천이각도(η) 이하의 혼합모드 하에서는 식 (6)을 적용한 응력확대계수를 적용하고, η 각 이후인 모드 I 상태에서는 다음 식 (15)를 적용하여 응력확대계수를 적용하였다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f_I(a/W) \quad (15)$$

그 결과를 Fig. 13, 14, 15 (b)에 나타내었으며, 그림에서 보여지듯이 세 경우 모두 Paris 이론을 만족하는 선형성을 보이고 있다. Fig. 16은 모드 I+II($\beta_0 = 30, 45, 60^\circ$) 및 모드 I($\beta_0 = 90^\circ$)의 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 모든 조건에서의 시험 결과가 잘 일치함을 보이고 있으므로, 균열천이각도를 기점으로 응력확대계수를 달리 적용하는 것이 타당하다고 본다.

5. 결론

- (1) 경사균열에서의 균열성장 방향을 최대원주응력 및 최소변형률에너지밀도 조건을 근거로 하여 해석한 결과, 균열발생 초기에는 시험결과와 잘 일치하나, 균열길이 가 길어질수록 차이가 커짐을 알 수 있다.
- (2) 경사균열성장은 초기에는 하중방향에 대하여 경사를 이루며 진전하나, 균열길이가 길어질수록 하중방향에 대하여 직각방향으로 천이하였다. 균열진전 방향의 천이는 경사균열의 초기균열각도와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.
- (3) 균열성장방향 천이 이전과 이후의 응력확대계수를 달리 적용함으로써, 경사균열의 성장속도와 방향을 더욱 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) D. Broke, 1986, "elementary engineering fracture mechanics," Martinus Nijhoff Publishers.
- (2) 정의효, 허방수, 권윤기, 오택열, 2000, "혼합모드(I+II)하에서 각도와 균열길이 변화를 갖는 피로균열 전파거동," 한국공작기계학회지, 제9권, 제5호, pp. 73~79.
- (3) 이억섭, 김동준, 류황희, 1999, "혼합모드 하중에서의 피로균열전파방향과 피로수명예측," 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제9호, pp. 1550~1558.
- (4) F. Erdogan and G. C. Sih, 1963, "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear," J. of Basic Engin., Vol. 85, pp. 519~525.
- (5) H. Kitagawa and R. Yuuki, 1977, "Analysis of Arbitrarily shaped crack in a finite plate using conformal mapping," Trans. Japan Soc. Mech. Engrs., Vol. 43, No. 376, pp. 4354~4362.
- (6) G. C. Sih, "Energy-density concept in fracture mechanics," Engin. Frac. Mecha., 5, pp. 1037~1040.
- (7) G. C. Sih and B. M. Barthelemy, 1980, "Mixed mode fatigue crack growth predictions," Engrs. Frac. Mech. Vol. 13, pp. 439~451.