

혼합모드 하중에서의 STS304의 피로균열 전파거동

송삼홍*, 이정무**

Fatigue Crack Propagation Behavior in STS304 under Mixed Mode Loading

Sam Hong Song* and Jeong Moo Lee**

ABSTRACT

The use of fracture mechanics has traditionally concentrated on crack growth under an opening mechanism. However, many service failure occur from cracks subjected to mixed mode loadings. Hence, it is necessary to evaluate the fatigue behavior under mixed mode loading. Under mixed mode loading conditions, not only the fatigue crack propagation rate is of importance, but also the crack propagation direction. The mode I and II stress intensity factors of CTS specimen were calculated using elastic finite element method. The propagation behavior of the fatigue crack of the STS304 steels under mixed mode loading condition was evaluated by using stress intensity factors K_I and K_{II} . The MTS criterion and effective stress intensity factor were applied to predict the crack propagation direction and the fatigue crack propagation rate.

Key Words : Mixed Mode(혼합모드), Fatigue Crack Propagation Behavior(피로균열전파거동), Compact Tension Shear Specimen(CTS시험편), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도), Fatigue Life(피로수명)

1. 서론

실제 구조물에 작용하는 응력상태는 복합적이어서 이로 인해 발생하는 대부분의 균열은 일반적으로 혼합모드 양상을 나타낸다. 그러므로 혼합모드 하중에 대한 연구의 필요성은 증대되고 있으며, 혼합모드의 균열발생 및 전파메카니즘을 밝히기 위한 다양한 연구가 이론적, 실험적으로 진행되고 있다.⁽¹⁾

혼합모드 하중에서의 피로균열 전파거동에 대

한 연구는 적절한 시험편과 실험방법의 개발⁽²⁾, 파괴인성치의 결정⁽³⁾⁽⁴⁾, 균열의 전파방향 예측⁽⁵⁾, 균열 전파속도의 평가⁽⁶⁾⁽⁷⁾에 대하여 주목하여왔다. 그러나 균열의 발생과 전파거동에 미치는 혼합모드 하중에 대한 영향평가의 통일적인 비교는 혼합모드 시험편과 실험방법의 다양성 및 상이한 연구 결과들의 보고로 인하여 어려운 실정이다.

또한 혼합모드 피로시험에 대한 표준시험편은 없으며, 여러 가지 시험편이 사용되고 있다. 그 중에서 CTS(Compact Tension Shear)시험편은 형상이

1998 2001년 3월 20일 접수

* 고려대학교 기계공학과

** 고려대학교 대학원 기계공학과

단순하며, 하중장치와 함께 모드조절이 용이하기 때문에 실험에 자주 사용되고 있다. 하지만 CTS 시험편은 과도한 노치와 예비균열이 필요하며, 균열이 전파함에 따라 균열의 전반부에서 시험편의 굽힘에 의한 영향을 받는다. 또한 CTS 시험편을 이용한 실험은 과대하중과 같은 고하중 조건의 부하에도 어려움이 있다. 그러므로 기존의 실험영역을 수정, 확대하기 위한 연구가 필요하며, 수정된 관찰범위에 대한 고찰은 응력확대계수식의 결정 및 평가를 수반하여야 한다. 그리고 혼합모드 균열의 전파방향에 대한 고찰은 모드II 영향의 증가와 전파각도 사이의 관계 및 관련 파라미터의 설정에 초점을 두어야 한다. 또한 혼합모드 하중에 의한 균열의 전파는 모드I 이 지배적인 상태에서 일어나지만⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 모드II의 영향을 배제할 수 없으며, 전파과정에서 모드II 영향에 대한 해석은 부족한 실정이다.

본 연구는 냉간 압연 스테인리스 강(STS304)을 시험재료로 CTS 시험편을 사용하여 혼합모드 I+II 하중에서의 피로균열 전파거동을 평가하고자 하였다. 세부적인 연구내용은 다음과 같다. 첫째, CTS 시험편의 확장된 균열길이비 영역에 대하여 응력확대계수식을 결정하고 이를 평가하였다. 둘째, 균열선단의 혼합모드 하중상태와 균열전파각도와와의 관계를 고찰함으로써 전파방향과의 관련요소를 설정하고, 예측이론의 적용 타당성을 확인하였다. 셋째, 피로수명과 전파속도를 비교 검토함으로써 모드II 하중이 피로균열 전파거동에 미치는 영향과 이에 대한 반영 및 평가에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 및 유한요소해석

2.1 시험재료

본 연구에 사용된 재료는 KS D 3698에 규정된 냉간 압연 스테인리스 강(STS304)이며, 이는 내식성이 요구되는 구조물의 배관, 연결 가스켓 및 구조 보강지지용으로 주로 사용된다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 2에 나타낸 것과 같다.

2.2 시험편과 하중장치

혼합모드 하의 피로균열 전파실험에 대한 표준

Table 1 Chemical composition of STS304

Composition (Wt%)				
C	Cr	Ni	Mn	Si
0.08	18.10	7.98	1.42	0.23

Table 2 Mechanical properties of STS304

Yield strength	MPa	286
Tensile strength	MPa	618
Hardness	Hv	198

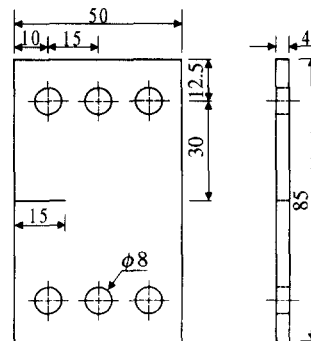


Fig. 1 Configuration of fatigue test specimen

이 정립되지 않은 실정이어서 본 연구는 혼합모드 재현을 위해 형상이 단순하고, 모드혼합도의 조절이 용이한 CTS 시험편과 하중장치⁽²⁾를 사용하였다. 본 실험에 사용된 CTS 시험편은 두께와 노치길이를 수정하여 편측노치 인장 (SENT: Single Edge Notched Tension) 시험편과 유사한 조건이 되도록 하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타낸 것과 같다.

하중장치는 Richard와 Benitz⁽²⁾가 고안한 장치를 기본으로 하여 강⁽⁴⁾이 수정, 제안한 모델을 응용한 것이다. 하중장치는 편 홀 각도변화에 따라 피로 시험기의 단축 인장하중으로 시험편에 다양한 혼합모드 하중상태를 조성할 수 있도록 제작되었다. 실험조건은 하중장치를 이용하여 하중작용각도 ϕ 가 0°인 모드 I 으로부터 혼합모드 I+II 와 90°의

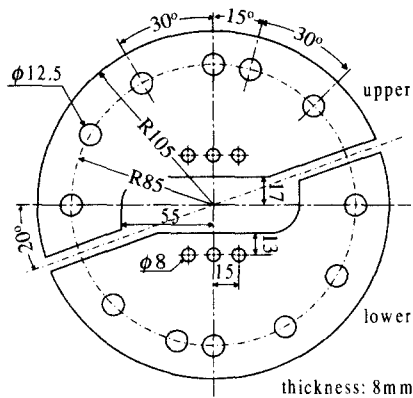


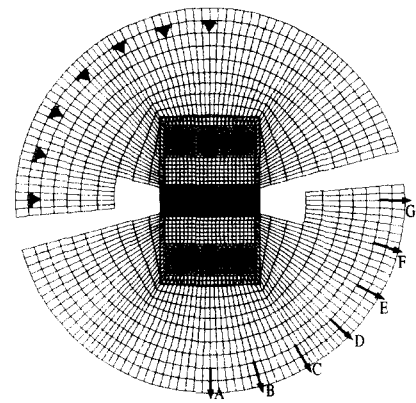
Fig. 2 Configuration of loading device

모드 II 까지 다양하게 변화시킬 수 있다. 하중장치의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다.

2.3 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 시험기는 전기유압식 인장 압축 피로시험기인 INSTRON 1331이며, 피로시험은 인장-인장상태의 일정진폭 하중 하에서 수행하였다. 하중조건은 최대응력의 크기가 44MPa이고, 응력비는 0.1이며, 주파수의 크기와 파형은 10Hz와 sine파형으로 설정하였다. 균열선단의 하중상태는 하중작용각도를 변화시킴으로써 모드 I 과 혼합모드 I + II의 상태가 조성되도록 하였다. 하중작용각도가 0°인 경우는 모드 I의 상태이고, 30°, 45°, 60°인 경우는 혼합모드 하중상태를 나타낸다.

피로균열의 측정은 100배율의 이동현미경을 이용하였다. 초기 균열선단을 원점으로 하고, 초기 균열면과 동일한 선상을 x축으로 하는 절대좌표계를 설정하여 전파하는 균열의 위치를 측정하였다. 전파하는 균열의 전파위치와 길이는 설정한 절대좌표계에 대한 균열선단의 수평 및 수직거리를 측정함으로써 나타내었다. 균열길이의 x와 y성분은 균열길이의 x좌표 증분이 0.2mm 전파할 때마다 균열선단에서의 좌표값으로 정하였다. 균열의 전파각도는 측정된 위치좌표와 x축이 이루는 각도를 수치적으로 계산하였다. 피로균열 전파속도의 계산은 7점 증분 다항법⁽¹⁰⁾ (Seven Point Incremental Polynomial Method)을 사용하였다.



Loading point : A, B, C, D, E, F, G

Mode I : A(φ=0°) Mode II: G(φ=90°)

Mixed Mode I + II: B(φ=15°) C(φ=30°)

D(φ=45°) E(φ=60°)

F(φ=75°)

Fig. 3 Finite element analysis model

2.4 탄성 유한요소해석

CTS시험편의 응력확대계수는 상용프로그램인 EMRC의 NISA II와 ENDURE를 이용하여 2차원 탄성 유한요소해석으로 산출하였다. 시험편과 하중장치의 응력상태는 2차원 평면응력상태로 가정하였으며, 해석의 편이성을 위해 하중장치에 대한 모델링은 부분적으로 단순화하였다. 유한요소모델은 2차원 8절점 등매개요소와 균열선단의 특이요소를 사용하여 구성하였다. 응력확대계수 K_I , K_{II} 는 CTOD(Crack Tip Opening Displacement)법으로 산출하였다. 해석모델의 총 요소수와 절점수는 각각 7,850개와 20,203개이며, 모델과 구속조건은 Fig. 3에 나타내었다.

본 해석의 모델링에 대한 적합성 및 응력확대계수의 산출결과에 대한 정확도는 모드 I 응력확대계수를 편측노치 인장시험편의 이론해⁽¹²⁾와 비교함으로써 검토하였으며, 결과는 약 -3%대의 오차범위를 보였다.⁽⁹⁾⁽¹¹⁾ 혼합모드 하중에 대한 모드 I 과 모드 II 응력확대계수는 노치길이 15mm부터 동일 균열면 상으로 25mm까지 2mm씩 균열길이를 전파시키고, 각 전파단계에서 하중작용각도를 0°부터 90°까지 15°씩 변화시키면서 산출하였다.

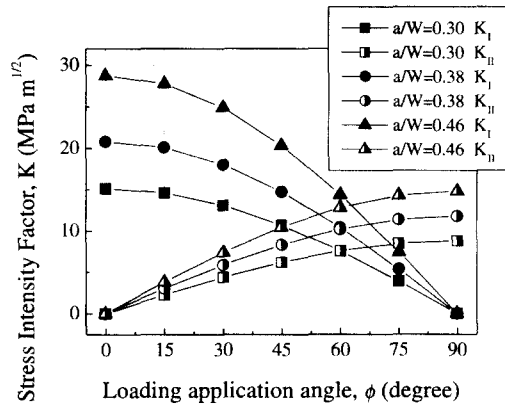
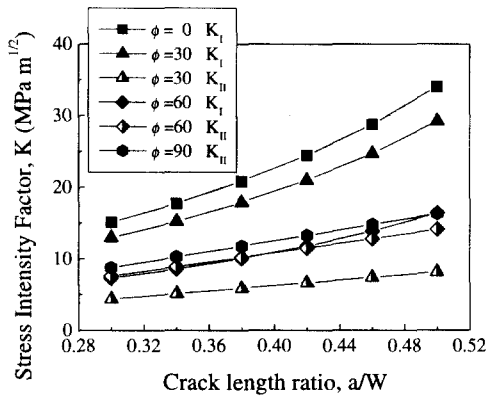


Fig. 4 K variation in CTS specimen by FEM

3. 실험결과

3.1 응력확대계수의 결정

CTS 시험편에 대한 응력확대계수식의 결정은 균열길이비의 영역이 0.44에서 0.70인 범위에 대해 주로 검토되었다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 그러나 실험조건 및 영역을 확대하기 위하여 본 연구에서 검토한 영역은 균열길이비 0.3에서 0.5이며, 이에 대한 혼합모드 하중에서의 응력확대계수식은 탄성 유한요소해석과 수치해석으로 결정하였다.

탄성 유한요소해석으로 산출한 혼합모드 하중에 대한 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 는 Fig. 4에 나타난 것처럼 하중작용각도와 균열길이비에 대하여

일정한 변화양상을 보였다. 이는 임의 하중작용각도와 균열길이에 대한 응력확대계수를 구할 수 있는 식으로 정리할 수 있음을 의미한다.

혼합모드에서 CTS 시험편에 대한 응력확대계수는 Hallbäck과 Nilson⁽³⁾에 의해 하중작용각도 ϕ 와 대체로 독립적인 함수로 나타낼 수 있다고 보고되었으며, 그 기본형태는 식 (1)와 같다.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos \phi f_I\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin \phi f_{II}\left(\frac{a}{W}\right) \dots\dots\dots(1)$$

여기서 P는 작용하중이고, a는 균열길이이며, W와 t는 시험편의 폭과 두께이다. 또한 ϕ 는 하중작용각도를 나타낸다.

본 연구의 검토영역 $0.3 \leq a/W \leq 0.5$ 에서 응력확대계수는 하중작용각도에 대하여 아래의 식 (2)와 같은 기본형태로 정리된다.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos \phi \sqrt{\cos \frac{\phi}{3}} f_I\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin \phi f_{II}\left(\frac{a}{W}\right) \dots\dots\dots(2)$$

식 (2)에서 $f_I(a/W)$, $f_{II}(a/W)$ 는 수치해석으로 구한 결과 아래와 같이 구할 수 있었다.

$$f_I(a/W) = 2.32158 - 14.36777(a/W) + 66.85752(a/W)^2 - 117.66921(a/W)^3 + 89.72502(a/W)^4$$

$$f_{II}(a/W) = -0.05741 + 4.36076(a/W) - 4.46168(a/W)^2 + 2.48807(a/W)^3$$

초기 균열면 상의 임의 균열길이에서 혼합모드 하중에 대한 응력확대계수는 식 (2)를 이용하여 산출할 수 있으며, 이에 대한 오차범위는 탄성 유한요소해석으로 산출한 결과와 비교함으로써 산정할 수 있다. K_I 은 $0^\circ < \phi \leq 60^\circ$ 에서 4.2% 이하의 차이를 나타냈으며, $60^\circ < \phi < 90^\circ$ 에서는 균열길이비 0.3의 경우 19%, 0.4의 경우 9%대의 오차를

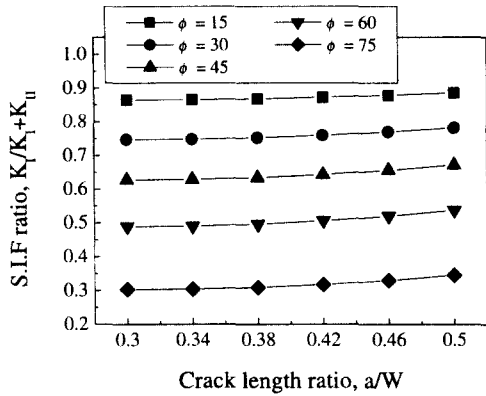


Fig. 5 $K_I/(K_I+K_{II})$ with ϕ

보였다. 반면, K_{II} 는 $0^\circ < \phi < 90^\circ$ 에서 0.46% 이하의 오차를 보였다. 그러므로 $0.3 \leq a/W \leq 0.5$ 에서 혼합모드 하중의 작용에 대해 K_I 는 시험편의 형상영향을 크게 받는 반면 K_{II} 는 거의 받지 않는 것으로 판단된다.

3.2 피로균열의 전파방향

3.2.1 피로균열의 전파각도

혼합모드 하중상태에서 피로균열은 모드 I 과 달리 초기 균열에 대하여 임의 각도를 이루어 전파하므로 전파각도에 대한 예측이 필요하다. 초기 노치나 예비균열의 선단에 작용하는 혼합모드 하중상태는 균열의 초기 전파각도에 영향을 미치는 요소이며, CTS시험편에서 초기 전파각도는 추가적인 환경영향이 없을 경우 전반적인 전파방향의 예측을 가능하게 하는 중요한 요소이다.

균열선단의 하중상태와 전파방향과의 관계는 식 (2)로부터 구한 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 를 이용하여 균열길이 변화에 따른 응력확대계수비 $K_I/(K_I+K_{II})$ 의 변화를 고찰함으로써 확인하였다. 균열길이비 0.3에서 0.5사이의 임의 초기 균열선단에 대하여 $K_I/(K_I+K_{II})$ 의 변화는 하중작용각도의 변화에 따라 Fig. 5에 나타낸 것과 같은 양상을 보인다. 이는 하중작용각도와 응력확대계수비 사이에 일정한 관계가 있음을 보이는 것이며, 하중작용각도의 변화에 따른 균열선단의 상태는 응력확대계수비로 나타내어 균열의 전파각도와 관계지

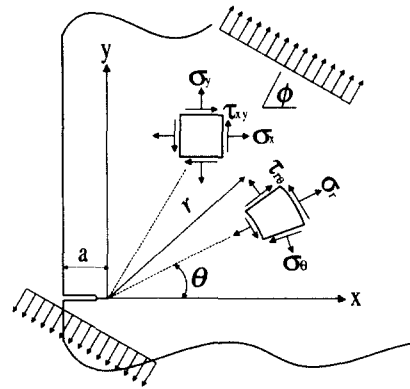


Fig. 6 Stress components near the crack tip

을 수 있다.

본 실험에서 균열의 전파각도는 균열길이가 측정단위길이인 0.2mm 전파하였을 때 초기 균열과 이루는 각도로 정의하였다. 초기 균열상태인 균열길이비 0.3에서 하중작용각도의 변화에 따라 측정된 균열의 전파각도는 하중작용각도가 30° 의 경우는 $30^\circ \sim 32^\circ$ 이고, 45° 의 경우는 $40^\circ \sim 43^\circ$ 이며, 60° 의 경우는 약 $48^\circ \sim 54^\circ$ 로 각각 측정되었으며, 하중작용각도가 증가할수록 큰 편차를 보였다. 결과적으로 초기 균열로부터 발생하는 균열의 전파각도는 하중작용각도와 일치하지 않았으며, 피로균열은 $K_I/(K_I+K_{II})$ 의 비율에 따라 일정하게 기울어진 전파각도를 가지고 전파하였다.

3.2.2 균열전파방향 예측이론의 적용과 비교

임의 균열길이와 하중작용각도에 대하여 균열의 전파각도는 응력확대계수비와의 일정한 관계를 이용하여 예측될 수 있다. 전파방향을 예측하기 위하여 본 연구는 실험에서 측정된 전파각도와 전파방향예측이론을 적용하여 얻은 결과를 비교함으로써 예측이론의 적용 타당성을 고찰하였다. 적용한 예측이론은 혼합모드 하중에서의 여러 제안된 균열전파방향에 대한 연구 이론 중에서 최대주응력이론(Maximum tangential stress criterion)이다. 최대주응력이론⁽⁵⁾은 Fig. 6에 표시한 극좌표계의 응력요소에서 피로균열의 전파방향이 최대주응력인 σ_θ 와 직각인 방향으로 일어난다는 가정 하에 전파각도를 산출한다. 그리고 혼합모드 하중하에서

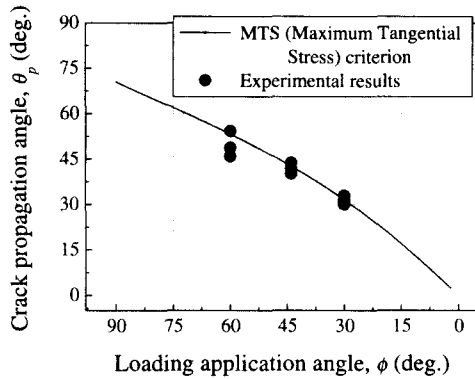


Fig. 7 Comparison with MTS criterion and experimental crack propagation angle

의 균열의 전파각도 θ_p 는 다음의 식으로 산출할 수 있다.

$$\left(\tan \frac{\theta_p}{2}\right)_{1,2} = \frac{K_I}{4K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \quad (3)$$

Fig. 7은 최대주응력이론을 적용하여 예측한 균열전파각도와 실험에서 측정된 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 각각의 균열전파각도를 비교한 결과, 하중작용각도 30°와 45°의 경우는 잘 일치하는 반면 하중작용각도 60°의 경우는 상대적으로 시험편에 따라 편차를 보였다. 이로써 하중작용각도의 변화에 따라 K_I/K_{II} 는 균열의 전파각도에 차이를 나타나게 하는 요소이며, 균열의 전파각도는 최대주응력이론을 적용하여 예측할 수 있음을 확인하였다. 모드II 성분의 증가에 따라 상대적으로 크게 나타나는 전파각도의 실험편차는 균열선단에서의 상태, 재질의 조건, 시험편의 형상, 실험시 하중전달의 편차, 균열발생기구의 복잡성 등에 기인하는 것으로 판단된다.

3.3 피로균열의 전파거동

3.3.1 전파균열의 응력확대계수 변화

혼합모드 하중에서 균열은 초기 균열로부터 모드II 성분이 소멸되는 방향으로 전파하므로 균열의 전파거동은 모드 I 이 지배적인 조건에서 전파

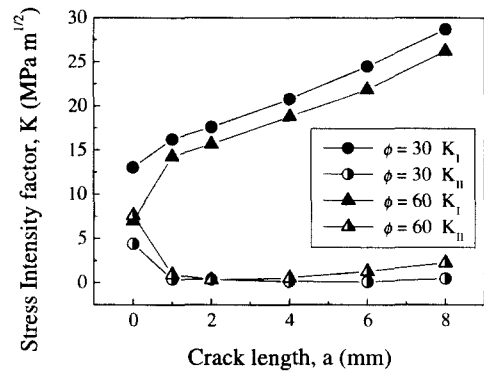


Fig. 8 K variation on crack propagation by FEM

하는 것으로 연구되고 있다. 하지만 균열의 전파과정 중 K_{II} 의 변화에 대한 지속적인 고찰은 부족한 실정이다. 본 절은 전파하는 균열의 거동특성을 규명하고자 균열의 전파과정에 대하여 응력확대계수의 변화를 고찰하였다. 전파하는 균열에 대한 응력확대계수는 피로시험의 결과로 얻은 균열의 전파경로를 탄성 유한요소해석에 반영함으로써 구하였다. 해석은 전파하는 균열의 길이를 1mm 단위마다 직선으로 가정하여 하중작용각도 30°(MC30)와 60°(MC60)의 해석모델에 대하여 수행하였다. 응력확대계수는 전파경로를 따라 균열길이를 1, 2, 4, 6, 8mm까지 순차적으로 전파시키면서 각각의 균열선단에 대하여 구하였으며, 해석에 의해 산출된 응력확대계수의 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

CTS시험편에서 전파과정 중 나타나는 응력확대계수의 변화특징은 균열발생단계에서 K_I 과 K_{II} 의 급격한 변화와 더불어 전파단계에서의 K_{II} 의 점진적인 회복이다. 균열발생단계에서 균열은 모드II의 영향이 감소하는 방향으로 발생하여 모드 I 이 지배적인 상태에 있게 된다. 이러한 영향으로 균열의 전파는 전파과정 중 하중작용각도의 심각한 변화, 불규칙한 하중의 부하 또는 기하학적 형상 등에 의한 추가적인 환경의 영향을 받지 않는다면 최초 발생단계에서 전파하기 시작한 경로를 크게 벗어나지 않는다.⁽¹³⁾ 하지만 유한요소해석의 결과처럼 전파단계에서의 K_{II} 는 완전히 0으로 수렴하

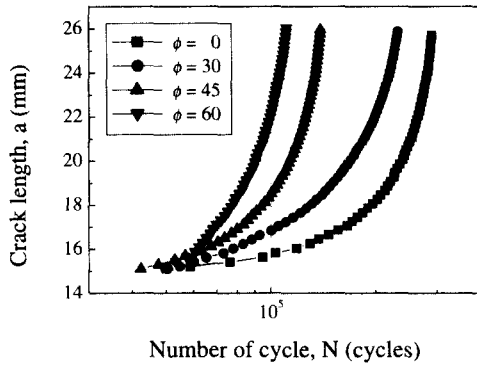


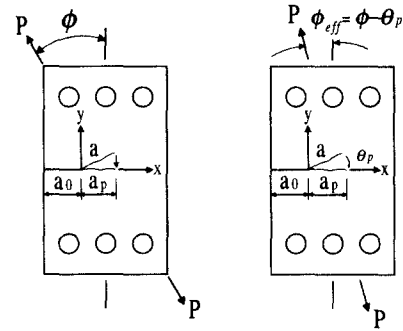
Fig. 9 a-N relation on loading application angle

지 않으며, 급격한 감소 후 다시 균열길이의 증가에 따라 회복하였다. 전파 중 응력확대계수의 변화는 MC30과 MC60모델에서 유사한 경향을 보이며, 모드II 하중비율이 큰 MC60 모델은 모드II 영향의 최소점이 MC30 모델보다 더 연장되어 나타나고, K_{II} 의 회복은 빠르고 크게 나타났다. 그러므로 피로균열의 전파과정에서 지속적으로 유지되는 모드II 영향은 향후 피로균열의 전파거동 평가에 반영되어야 한다.

3.3.2 피로수명과 피로균열 전파속도

혼합모드 하중에서 모드II 영향에 의한 균열의 전파거동은 실험조건들에 따라 연구결과에 차이를 보이고 있다. 그러므로 본 절은 발생 및 전파과정 중 지속적으로 작용하는 K_{II} 가 균열의 전파에 미치는 영향을 확인하고, 이를 전파거동 평가에 반영하기 위한 방법을 검토하였다.

모드II의 영향은 하중작용각도의 변화에 따라 나타난 피로수명을 비교함으로써 고찰하였다. 본 연구에서 피로수명은 전파균열길이가 전파경로의 차이와 관계없이 초기 노치로부터 10mm까지 전파되었을 때의 하중반복수로 정의하였다. 혼합모드 하중에서의 피로수명은 하중작용각도의 변화에 따라 Fig. 9와 같이 나타났다. 노치 선단으로부터 발생하는 피로균열의 발생은 혼합모드 하중조건에 따라 큰 차이를 보이지는 않았지만 모드I 하중조건과 비교하여서는 빠른 발생을 나타내었



(a) projected length (b) rotating length

a_0 : machined notch length or pre-crack length
 a_p : projected crack length
 θ_p : crack propagation angle
 ϕ_{eff} : effective loading application angle

Fig. 10 K evaluation on crack propagation

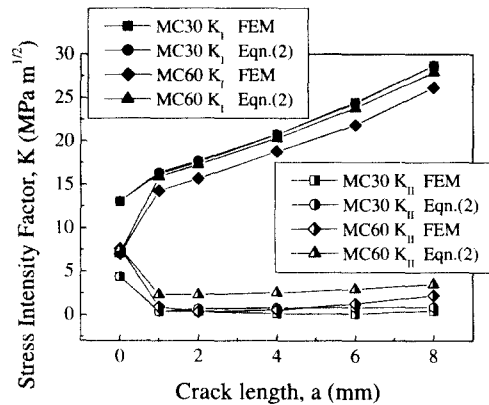


Fig. 11 Comparison of K variation

다. 또한 초기 발생수명의 장단이 전체 피로수명에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며, 이는 모드II 성분이 균열 발생에 미치는 영향을 의미한다. 혼합모드 하중에 의해 임의의 지점에 위치하는 전파균열에 대한 평가는 Fig. 10에 나타난 것과 같은 방법들에 의하여 이루어지고 있다.⁹⁾ 본 연구에서 적용한 균열 평가방법은 Fig. 10의 (b)와 같이 전파균열을 초기 균열면에 대하여 회전한 실제의 균

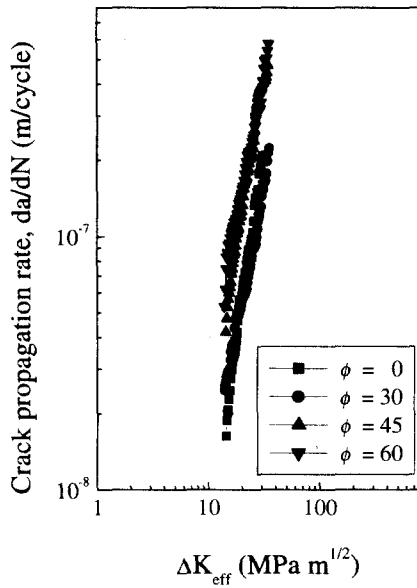


Fig. 12 ΔK_{eff} -da/dN relation

열길이와 유효하중작용각도 ϕ_{eff} 를 적용하는 것이다. 이 평가방법의 유효성은 실험에서 구한 전파경로상의 임의 균열에 대하여 상기의 평가방법과 식 (2)를 이용하여 산출한 응력확대계수를 탄성유한요소해석의 결과치와 비교함으로써 확인하였다. Fig. 11에 나타낸 것처럼 균열평가방법과 식 (2)에 의해 계산된 K_I , K_{II} 가 유한요소해석 결과보다 크게 산출되며, 하중작용각도가 증가할수록 비교차이가 크게 나타났다. 그러므로 혼합모드 하중에 의해 임의 전파위치에 있는 균열에 대한 평가방법은 균열의 길이와 유효하중작용각도의 적용에 있어서 개선의 필요성이 있음을 확인하였다.

혼합모드 하중에서의 피로균열전파속도에 대한 예측과 평가는 모드 I 상태와 같이 Paris 법칙을 이용할 수 있다. 균열전파속도는 혼합모드 하중에 의한 응력확대계수 K_I 와 K_{II} 를 조합한 유효응력확대계수 K_{eff} 를 도입하여 평가할 수 있으며, K_{eff} 는 Tanaka⁽⁶⁾가 제안한 식으로 산정하였다.

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{eff})^m$$

$$\Delta K_{eff} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{\frac{1}{4}} \dots \dots (4)$$

Fig. 12는 유효응력확대계수범위와 피로균열전파속도와의 관계를 하중작용각도별로 나타낸 것이다. 하중작용각도 30°의 경우 전파속도는 모드 I의 전파특성과 유사하며, 하중작용각도의 증가에 따라 45°와 60°의 경우는 약간의 증가경향을 나타내었다. 균열의 발생에서 나타난 초기 전파속도의 차이가 전파과정에서도 유지되고 있으며, 안정된 균열전파 영역에서의 전파속도는 하중작용각도와 관계없이 유사한 기울기를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 혼합모드 하중에서의 피로균열의 전파거동은 유효응력확대계수범위를 이용하여 예측, 평가할 수 있으며, 이로써 모드 II에 의한 영향을 비교 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 냉간 압연 스테인리스 강 (STS304)을 시험재료로 CTS시험편에 대한 혼합모드 피로시험과 탄성 유한요소해석을 수행하여 피로균열의 전파방향과 전파거동을 평가함으로써 다음과 같은 결론을 고찰하였다.

(1) CTS시험편의 수정된 $0.3 \leq a/W \leq 0.5$ 의 실험영역에서 혼합모드 하중에 대한 응력확대계수는 다음 식과 같이 표현할 수 있음을 확인하였다.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos \phi \sqrt{\cos \frac{\phi}{3}} f_I\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin \phi f_{II}\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f_I(a/W) = 2.32158 - 14.36777(a/W) + 66.85752(a/W)^2 - 117.66921(a/W)^3 + 89.72502(a/W)^4$$

$$f_{II}(a/W) = -0.05741 + 4.36076(a/W) - 4.46168(a/W)^2 + 2.48807(a/W)^3$$

(2) 혼합모드 하중에서의 피로균열 전파방향은 응력확대계수비 K_I/K_{II} 의 조건에 따라 초기 균열면으로부터 편향된 전파각도를 가지는 것으로 나타났다. 최대주응력이론을 적용하여 예측한 전파

방향은 실험결과와 비교적 잘 일치하였으며, 모드 II 하중의 증가에 따라 전파각도의 실험편차는 상대적으로 크게 발생함을 확인하였다.

(3) CTS시험편에서 전파하는 피로균열의 응력 확대계수는 균열발생단계에서 K_I 은 증가하고, K_{II} 는 급격히 감소하는 방향으로 변화하여 모드 I 이 지배적인 상태로 된다. 하지만 K_{II} 는 소멸하지 않고, 균열길이의 증가에 따라 회복하여 지속적으로 피로균열의 전파과정에 영향을 미친다. 혼합모드 하중에서의 수명은 모드 II의 성분이 증가함에 따라 모드 I의 수명보다 단축되었으며, 피로균열의 전파속도는 Tanaka가 제안한 유효응력확대계수를 Paris식에 적용함으로써 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. J. Qian and A. Fatemi, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," Eng. Frac. Mech., Vol. 55, pp. 969-990, 1996.
2. H. A. Richard, "A Loading Device for the Criterion of Mode in Fracture Mechanics," Int. J. Fracture, Vol. 22, pp. R55-R58, 1983.
3. N. Hallbäck and F. Nilson, "Mixed Mode I/II Fracture Behavior of an Aluminum Alloy," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 42, pp. 1345-1374, 1994.
4. 홍기주, 강기주, "혼합모드 하중을 받는 CTS 시험편에서 K_I , K_{II} 와 J-적분의 측정방법," 대한기계학회논문집, 제20권, 제11호, pp. 3498-3506, 1996.
5. F. Erdogan and G. C. Sih, "On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear," J. of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 519-525, 1963.
6. Keisuke Tanaka, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis," Eng. Frac. Mech., Vol. 6, pp. 493-507, 1974.
7. H. A. Richard, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," Advances Fracture Research, Vol. 5, pp. 3337-3344, 1986.
8. J. Qian and A. Fatemi, "Fatigue Crack Growth under Mixed Mode I and II Loading," Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 19, pp. 1277-1284, 1996.
9. 용장우, 진근찬, 이성근, 김종배, "5083-H115알루미늄 합금의 혼합 모드 피로균열성장 특성," 대한기계학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 461-471, 1989.
10. ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.01, pp. 565-601.
11. 한문식, "피로 균열 형상 진전의 수치 모델링 기법에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, pp. 225-233, 1999.
12. Y. Murakami, "Stress Intensity Factors Hand book," Pergamon Books, pp. 9-10, 1987.
13. 송삼홍, 배준수, 최병호, "불규칙하게 분포된 미소결합사이의 응력간섭 및 피로균열 거동에 대한 실험적 연구(II) (결합간의 거리 및 하중변화를 중심으로)," 한국정밀공학회지, 제18권, 제1호, pp. 201-212, 2001.