

혼합모드 하중에서의 피로균열 전파거동

송삼홍(고려대 기계공학과), 이정무*, 최병호(고려대 대학원)

Fatigue Crack Propagation Behavior under Mixed Mode Loading

S. H. Song(Mech. Eng. Dept., Korea Univ), J. M. Lee and B. H. Choi(Graduate school, Korea Univ.)

ABSTRACT

Practical structures are subject not only to tension but also to shear and torsional loading. Even under uniaxial loading, when the load is not perpendicular to the crack plane, mixed mode crack can occur. Hence, it is necessary to evaluate the fatigue behavior under mixed mode loading. In this study, the propagation behavior of the fatigue crack of the STS304 steels under mixed mode loading condition was investigated. The mode I and II stress intensity factors of CTS specimen were calculated using elastic finite element method with experimental results. The fatigue crack propagation under mixed mode was evaluated by the effective stress intensity factor proposed by Tanaka.

Key Words : Mixed Mode (혼합모드), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Fatigue Crack Propagation Behavior(피로균열전파거동), CTS Specimen(Compact Tension Shear 시험편)

1. 서론

기계부품이나 구조물 내에 존재하는 균열은 균열면에 대한 변위의 방향에 따라 기본적으로 모드 I, II, III의 변형형태로 구분할 수 있으며, 기존의 연구는 균열의 진전에 지배적으로 영향을 미치는 모드 I 상태의 경우에 대해 집중되어 왔다.

그러나 일반적인 경우 균열의 진전거동은 세 가지 모드가 함께 작용하여 일어나고, 실제 구조물에 작용하는 하중은 대부분 다축에 의한 것이다. 이로 인해 형성되는 응력상태와 균열에 미치는 영향은 혼합모드의 양상을 나타낸다. 또한 모드 I의 조건 하에서도 미시적 관점에서의 균열전파양상은 혼합모드 하의 거동을 보인다.

다양한 환경조건에 대한 기계구조물의 소형화 경향에서 미소균열이 전체 과단강도에 미치는 영향이 중요하게 되었고, 복합 및 접합에 의한 비균질 또는 비등방성 소재들의 개발과 응용 및 기하학적으로 복잡한 부품, 구조물들의 설계조건 등에 의하여 균열은 실제 혼합모드 상태로 진전하게 된다. 이러한 이유들로 혼합모드 하의 균열거동에 대한 연구가 확대되고 있다.⁽¹⁾

혼합모드에 대한 대부분의 연구는 선형탄성파괴

역학 해석을 바탕으로 응력확대계수와 J 적분값 등의 파괴인성치에 대한 결정과 이들 파라미터를 이용한 파괴조건, 피로균열 전파방향의 예측 및 피로균열전파율에 대한 연구가 진행되고 있다. 혼합모드에 대해서 다양한 시험편과 실험조건에 의한 실험들이 수행되고 있지만 혼합모드에 대한 표준의 제정은 되지 못한 실정이다.

본 연구에서는 일반적으로 발생하는 모드 I 과 II의 혼합모드 하중상태 하에서 스테인리스강(STS304)의 피로균열 전파거동에 대해 전반적인 평가를 하고자 한다. 혼합도의 조절이 용이한 하중부하장치와 CTS 시험편을 수정, 개발하여 혼합모드의 하의 피로 시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 CTS시험편에 대한 응력확대계수를 결정하고, 이를 조합한 유효응력확대계수를 이용하여 피로균열의 전파거동에 대하여 평가하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 하중 부하장치 및 시험

혼합모드 하중상태를 조성하기 위하여 본 실험에서는 Richard와 Benitz⁽²⁾가 제안한 모드 혼합도의

조절이 용이하고 적용범위가 넓은 하중 부하장치를 수정 개발하여 하중작용각도를 변화시킴으로써 피로시험을 하였다. 형상이 단순하고 상대적으로 크기가 작은 CTS(Compact Tensile Shear)시험편을 하중부하장치에 연결시켜 단축하중으로 여러 가지 혼합모드 상태를 조절할 수 있었다. 시험편은 길이방향이 압연방향이 되도록 취하여 절단기와 밀링머신으로 가공한 후 시험편의 중앙에 휠커터를 이용하여 노치를 15mm가 되게 가공하였다. CTS 시험편과 하중부하장치의 개략도는 Fig. 1, 2와 같다.

본 실험에 사용된 재료는 내식, 내열성 및 기계적 성질이 우수하여 각종 발전소 등의 배관이나 구조 지지용에 적용하고 있는 냉간압연 스테인리스 강판(KS D3698)인 STS304로서 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다

2.2 피로시험

혼합모드에 대한 실험조건은 다음과 같다. 하중 조건으로는 P_{max} 가 44MPa이고 응력비가 0.1인 정현파의 반복인장하중을 가하였고, 주파수는 10Hz로 하였다. 혼합모드 하중상태의 조건을 만들기 위하여 시험편에 대한 하중작용각도를 30°, 45°, 60°로 각각 변화시키면서 실험하였다. 동일한 CTS 시험편에 대해 모드 I 하에서의 피로시험을 행하여 혼합모드의 실험결과와 비교하였다.

전파균열길이의 측정은 100배율의 이동현미경을 이용하였으며, 이동현미경 상의 x축 증분을 0.2mm 단위로 이동시켜 균열선단의 x축과 y축 좌표값을 기록하였다. 시험편 폭에 대한 균열길이의 비(a/W)가 0.3에서 0.5인 범위에서 균열의 전파를 관찰하였다. 하중반복수에 해당하는 전파균열길이의 증분은 측정된 균열선단의 좌표값들을 이용하여 산정하였다. 피로균열전파에 대한 실험방법은 ASTM E-647에 의거하여 수행하였다.

2.3 CTS시험편의 응력확대계수

2.3.1 K_I 과 K_{II} 결정식

CTS시험편에 대한 응력확대계수는 유사한 실험에 대해 Hallback과 Nilson⁽³⁾이 적용한 결정식과 방법을 이용하였다.

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

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

여기서 P는 작용하중, a는 균열길이, W는 시험편

의 폭, t는 두께이며 ψ 는 하중 작용각이다.

상기 응력확대계수식의 $f_I(a/W)$, $f_{II}(a/W)$ 는 실험 결과에 대해 유한요소해석을 이용하여 구하였다.

Table 1 Chemical composition of STS304 (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
Elongation (%)	78
Hardness (Hv)	198

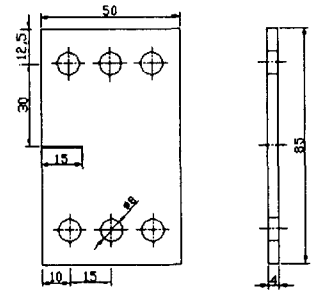


Fig. 1 Geometry of CTS specimen

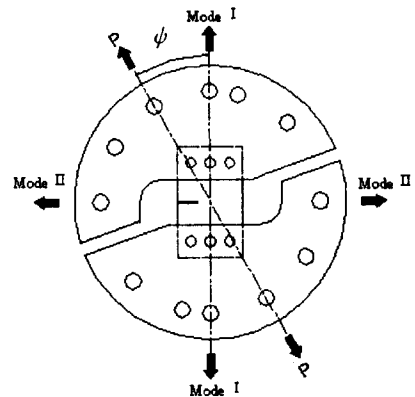


Fig. 2 Loading device for mixed mode test

2.3.2 유한요소해석

응력확대계수식을 결정하기 위하여 범용 프로그램인 EMRC/NISA2와 ENDURE를 이용하여 탄성유한요소해석을 행하였다. 2차원 평면응력상태로 가정하

고 하중부하장치와 시험편의 결합이 균열선단에 미치는 영향은 없는 것으로 가정하여 시험편에 대해서만 해석을 하였다. 균열선단요소에는 특이요소를 사용하였고 그 외는 2차원 등매개요소를 적용하여 시험편에 대해 완전모델로 해석을 하였다.

30°, 45°, 60° 로 하중작용각도를 변화시킨 혼합모드에 대하여 전파한 균열길이를 일정간격으로 구분한 균열선단에서의 K_I , K_{II} 값을 구하였다. 유한요소해석으로 구한 K_I , K_{II} 값을 (1)의 결정식에 대입하여 산정한 $f_I(a/W)$, $f_{II}(a/W)$ 식은 다음과 같다.

$$f_I\left(\frac{a}{W}\right) = 2.942 - 2.918\left(\frac{a}{W}\right) + 11.188\left(\frac{a}{W}\right)^2$$

$$f_{II}\left(\frac{a}{W}\right) = 0.800 - 1.791\left(\frac{a}{W}\right) + 5.137\left(\frac{a}{W}\right)^2$$

(2)

위 식의 적용범위는 $0.3 \leq a/W \leq 0.5$ 이다.

Richard와 Benitz가 제안한 CTS 시험편의 0.5와 0.7사이의 적용범위보다 작은 영역에 대하여 적용할 수 있다. Fig. 3은 균열길이의 증가에 따른 K_I , K_{II} 의 변화 양상을 나타낸 것이다.

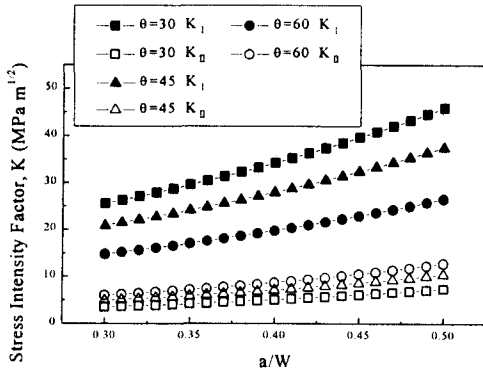


Fig. 3 Variation of K values respect to crack length

3. 실험결과 및 고찰

3.1 혼합모드의 피로균열 전파방향

혼합모드 하에서의 피로균열전파는 모드 I 하중 하에서의 양상과 다르며, 균열이 초기균열의 형상과 동일하게 전파하지 않는 것이 특징이다. 초기 균열의 분기각은 하중작용각도와 동일하지 않고 K_I/K_{II} 에 의해 지배되며, 균열이 전파함에 따라 분기각은 점차 감소하게 된다. 하중작용각도 $\phi = 30^\circ$ 일 경우 약 26° , 45° 일 경우는 약 $38\text{--}41^\circ$, 60° 일 경우는 약 $49\text{--}50^\circ$ 로 초기균열에 대한 분기각을 가지고 전파하여 나간다. 하중작용각도별 균열의 전파경로는

Fig. 4에 나타내었다.

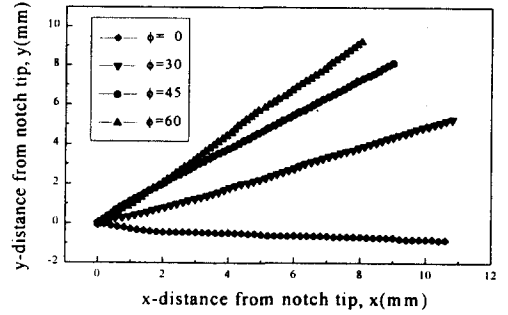


Fig. 4 Crack propagation path

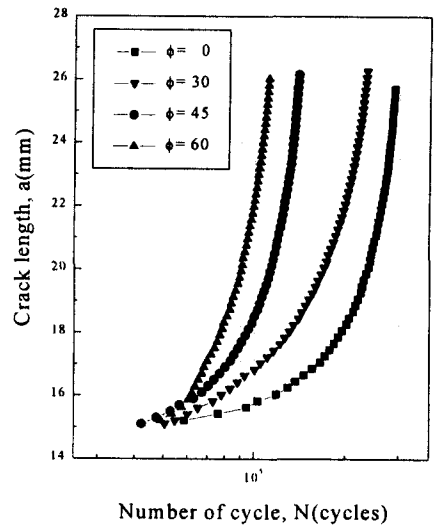


Fig. 5 a-N relation for loading application angle

3.2 혼합모드의 피로균열 전진거동

혼합모드 하에서의 수명은 피로시험을 시작하여 전파균열길이가 하중작용각도에 따른 전파경로와 관계없이 10mm가 될 때까지의 하중반복수로 정하였으며 하중작용각도별로 균열길이에 대한 수명은 Fig. 5에 나타내었다. 수명은 하중작용각도가 증가할수록 즉, K_{II} 성분의 증가가 균열의 발생과 전파수명에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

혼합모드 하의 피로균열전파율에 대한 평가는 응력확대계수 K_I , K_{II} 를 조합한 유효응력확대계수를 이용하여 평가하였다. 전파균열의 경로가 초기균열 형상과 동일하지 않게 전파하는 혼합모드 하의 균열에 대하여 다음과 같은 방법으로 전파균열을 적용하여 응력확대계수를 구하였다. 실제균열길이를 초기

의 균열면에 대하여 분기각도 만큼 회전이동 시킨 균열길이에 대하여 평가하였으며, 이때 분기 회전각 만큼을 하중작용각도로부터 제외함으로써 유효하중 각도를 정의하여 응력확대계수를 구하였다.

혼합모드 하의 피로균열전파속도는 Paris 법칙에 의하여 평가할 수 있으며 이때 피로균열전파에 따른 유효응력확대계수를 적용하여 평가한다. 하중작용각도에 따른 K_I 과 K_{II} 의 영향을 고려한 혼합모드 하의 유효응력확대계수는 Tanaka⁽⁴⁾가 제안한 식을 사용하였다.

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

$$\Delta K_{eff} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

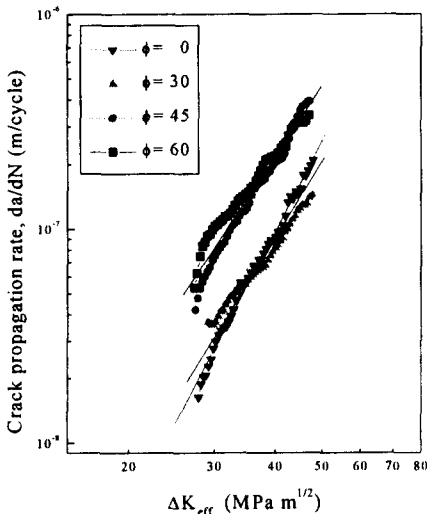


Fig. 6 da/dN- ΔK_{eff} Relation

Fig. 6에서처럼 혼합모드 하의 피로균열 전파속도를 K_{II} 가 평가된 Tanaka 식의 유효응력확대계수를 사용하여 평가할 수 있다. 하중작용각도를 기준으로 구분하여 보면 30°의 혼합모드인 경우 피로균열전파속도를 모드 I 상태의 피로균열전파속도와 함께 평가할 수 있으며, 이는 모드 I 균열전파 특성에 의존함을 알 수 있다. 하중작용각도 45°, 60° 일 때의 균열전파속도 또한 하나의 ΔK_{eff} 에 대하여 함께 평가할 수 있다. 유효응력확대계수를 이용하여 각각의 하중작용각도에 따른 균열전파율을 구분하여 평가할 수 있었으며 이러한 차이에 대한 규명과 또 다른 파라미터를 이용한 평가와의 비교가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 혼합모드 하중하에서의 STS304강의 피로균열 전파거동을 평가하기 위한 피로시험의 수행 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)혼합모드 하의 피로균열 전파거동을 평가하기 위한 응력확대계수는 실험과 유한요소해석을 통하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$K_I = \frac{F\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos \psi \quad f_I\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f_I\left(\frac{a}{W}\right) = 2.942 - 2.918\left(\frac{a}{W}\right) + 11.188\left(\frac{a}{W}\right)^2$$

$$K_{II} = \frac{F\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin \psi \quad f_{II}\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f_{II}\left(\frac{a}{W}\right) = 0.800 - 1.791\left(\frac{a}{W}\right) + 5.137\left(\frac{a}{W}\right)^2$$

적용범위는 $0.3 \leq a/W \leq 0.5$ 이다.

(2)혼합모드 하의 피로균열전파 방향은 초기균열의 형상과 동일하게 전파하지 않으며 K_I/K_{II} 에 지배에 의해 하중작용각도별로 임의 경사각으로 전파한다.

(3)혼합모드 하의 피로균열전파율은 Tanaka가 제안한 유효응력확대계수를 Paris법칙에 적용함으로써 평가할 수 있었다. 하중작용각도 30°를 기준으로 피로균열전파속도를 구분하여 함께 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. 홍기주, 강기주, "혼합모드 하중을 받는 CTS 시험편에서 K_I , K_{II} 와 J-적분의 측정방법" 대한기계학회논문집(A) 제20권 제11호. pp.3498~3506, 1996
2. H. A. Richard, K. Benitz, "A Loading Device for the Creation of Mixed Mode in Fracture Mechanics" Int. J. Fract. Vol.22 R55~R58, 1983.
3. N. Hallback, F. Nilsson, "Mixed-mode I/II Fracture Behavior of an Aluminium Alloy" J. Mech. Phys. Solids Vol.42, No9, pp.1345~1374, 1994
4. Keisuke Tanaka, "Fatigue Crack Propagation from a Crack inclined to the Cyclic Tensile Axis", Eng. Fract. Mech Vol.47 No.6 pp.843~866, 1974