

원공 결함을 갖는 CTS 시험편의 혼합모드 하중 하에서의 피로균열 전파거동

송삼홍[†] · 신승만* · 이정무* · 서기정*

Fatigue Crack Propagation Behavior in CTS Specimen Under Mixed-Mode Loading with Hole Defects

Sam-Hong Song, Seung-Man Shin, Jeong-Moo Lee and Ki-Jeong Seo

Key Words : Crack Interaction(균열간섭), Crack Propagation Angle(균열전파각도), Fatigue Life(피로수명), Crack Propagation Path(균열전파경로), Crack Propagation Rate(균열전파속도), Compact Tension Shear Specimen(CTS 시험편), Mixed Mode(혼합모드)

Abstract

In this study, the propagation behavior of fatigue crack effected hole defects was investigated under mixed-mode I+II loading. To create mixed-mode stress field at crack tip, the compact tension shear (CTS) specimen and loading device were used in this tests. The propagation experiments of fatigue crack were performed by changing of the loading application angle(θ) and the distance(L) estimated from pre-crack tip to hole center located side by side with a pre-crack. As L changes, the variation for propagation aspect of fatigue crack, fatigue life and crack propagation rate were examined under mixed-mode loading. Under mixed-mode loading, the propagation rate of fatigue crack increased while the propagation direction changed dramatically because of the interference of hole defects.

1. 서 론

재료 내부 또는 표면에 결함이나 균열 등이 존재할 때 피로하중을 가하면 그것들을 기점으로 균열이 성장하고 파단에 이르게 된다. 이때 균열의 전파 거동이 주위의 다른 결함이나 균열 등에 의하여 간섭을 받아 단일 균열이 진전할 때의 균열 거동과는 다른 양상을 갖게 되는 경우가 있어 이에 대한 연구가 필요하다. 지금까지 여러 가지 형태의 간섭장에 대하여 연구가 이루어져 왔다. 원공 사이의 간섭에 대한 연구로 송과 김⁽¹⁾은 원공들이 서로 인접한 경우 유한요소를 이용하여 응력간섭효과를, 송과 배⁽²⁾는 원공이 존재하는 위치에

따른 피로거동과 원공 사이에서 발생한 균열들의 상호 간섭을 고찰하였다. 또한 송 등⁽³⁾은 균열 사이의 간섭에 대한 연구를 하였다. 2 개의 원공 또는 여러 개의 원공 결함이 인접하게 위치하여 간섭하는 경우나 균열과 균열에 관한 연구를 통해 원공과 개재물이 존재하는 경우 응력확대계수(stress intensity factor)에 큰 영향을 미치고 있음을 보고하고 있다. 이러한 연구들이 비교적 활발이 수행되어 오고 있는데 반하여 균열과 원공의 간섭에 대한 연구는 적다. 전파하는 균열과 인접한 원공 사이에는 원공의 영향으로 인하여 혼합모드의 하중상태를 나타내는 응력간섭장이 형성되어 피로 균열의 진전경로를 휘어지게 한다. 따라서 응력확대계수 등을 이용한 수식화가 힘들어 실험결과에 의존하여 그 해석을 수행할 수밖에 없다.

본 연구에서는 혼합모드 I+II 하중 하에서 원공 결함의 영향을 받는 피로균열의 전파거동에 대해 고찰하기 위하여 단순인장전단(Compact Tension

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3353 FAX : (02)921-8532

* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

Shear : CTS) 시험편과 하중장치가 사용되었다. 예 비균열 선단에서부터 원공 중심까지의 거리(L)와 하중작용각도(θ)를 변화시키면서 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 피로균열의 전파실험을 수행하였다. 그리고 이 결과를 모드 I 또는 혼합모드 I+II 하중 하에서 나타난 피로거동과 비교함으로써 원공 결함을 가진 CTS 시험편의 피로거동을 고찰하였다. 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 균열선단에서 원공 중심까지의 거리(L)와 하중작용 각도(θ)에 따른 피로균열의 전파양상, 피로수명 및 균열의 전파속도에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 KS D 3519 에 규정된 자동차 구조용 열간 압연강판(SAPH440)이다. 이 재료는 주로 차체 하부구조의 강도를 유지, 보완하는 자동차의 프레임 및 차체와 차륜의 상하방향 지지와 강성을 유지하는 현가장치의 상, 하 암에 사용된다. 또한 여러 멤버류의 제작 및 결합에 적합하도록 프레스 가공성과 용접성이 우수한 구조용 열간 압연강판이다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 과 2 에 나타내었다.

2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 혼합모드 I+II 하중 하에서 전파하는 피로균열이 전방에 위치하는 원공 결함의 간섭으로 인한 피로균열 전파거동의 고찰을 위하여 균열선단에 혼합모드 응력장을 형성하여 실험을 수행하였다. 이를 만족하기 위하여 단순인장전단 (Compact Tension Shear : CTS) 시험편과 하중장치를 수정하여 사용하였다. 수정 CTS 시험편과 하중장치는 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나타낸 것과 같다. 시험편은 높은 혼합비의 실험시 하중전달의 정확성과 실험의 안정성을 확보하기 위하여 하중장치와의 체결부위와 노치가 가공되는 평행부위가 수정되었다. 사용된 하중장치는 Richard 와 Benitz⁽⁴⁾ 의 모델을 기본으로 하여 제작된 것이다. θ 가 0° 인 경우는 인장하중이 작용하는 모드 I 의 상태를, 90° 인 경우는 전단하중이 작용하는 모드 II 하중상태를 나타내며, 이 두 각도 사이의 경우는 인장과 전단하중이 작용하는 혼합모드 I+II 의 하중상태를 나타낸다.

2.3 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 예비

Table 1 Chemical composition of SAPH440

Composition (Wt. %)				
C	Si	Mn	P	S
0.168	0.020	0.810	0.012	0.008

Table 2 Mechanical properties of SAPH440

Yield strength	Tensile strength	Hardness	Elongation
MPa	MPa	Hv	%
302	440	214	44

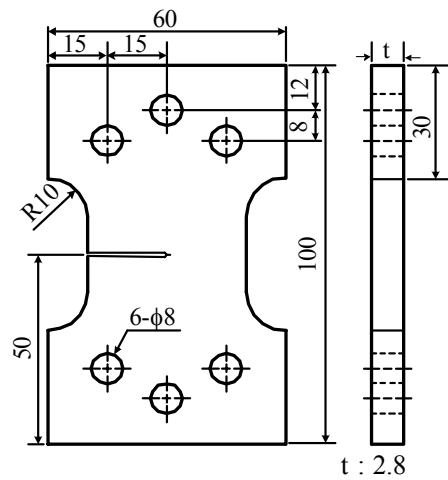


Fig. 1 Configuration of modified CTS specimen (unit : mm)

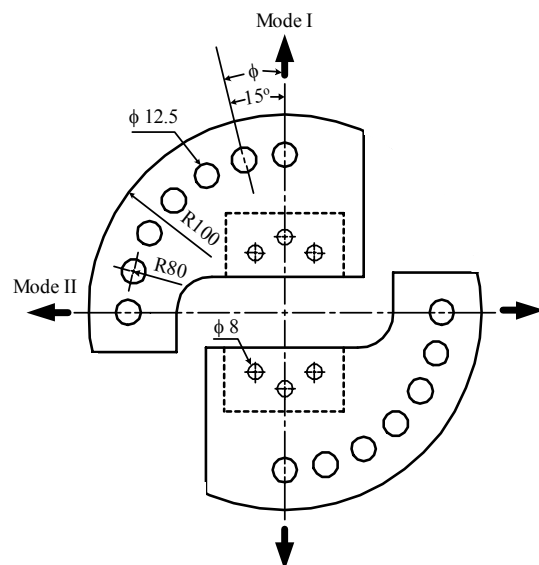


Fig. 2 Configuration of loading device

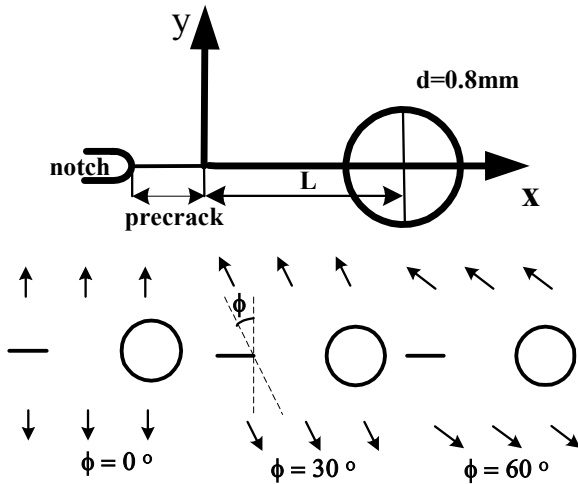


Fig. 3 Three types of the test condition

균열과 일직선상에 원공 결함이 위치하는 CTS 시험편에 각각 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중이 작용할 때 피로균열의 거동을 고찰하였다. 실험의 용이한 해석을 위해 단순화시킬 필요가 있으므로, 원공 결함의 위치는 균열선단 주변에 응력 간섭을 일으킬 수 있는 임의의 거리를 갖도록 배열하였다. 원공을 예비균열 선상에 나란한 위치에 지름 $d=0.8\text{mm}$ 로 고정시키고, 예비균열 선단에서 원공 중심 사이의 거리(L)은 각각 0.9mm 와 1.6mm 로 변화시켰다. 하중모드의 변화에 따라 관찰된 피로균열의 거동을 비교하기 위하여, 정규화된 균열길이($a/W=0.5125$)가 동일한 예비균열 시험편에 대하여 모드 I ($\phi=0^\circ$) 및 혼합모드 I+II ($\phi=30^\circ, 60^\circ$) 하중 하에서 피로 시험이 수행되었다.

본 연구에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로시험기인 Instron 1331 이다. 피로하중의 형태는 일정 진폭의 인장-인장하중상태이고, 응력비는 0.5 이며, 주파수의 크기와 파형은 10Hz 와 sine 파형이다. 최대작용응력(σ_{\max})의 크기는 40MPa 이다. 피로균열의 측정에는 균열이미지 캡처링 시스템이 사용되었다. 피로균열의 길이와 전파위치 는 초기균열인 예비균열선단에서의 균열 발생점을 기준으로 하는 좌표계(x-y)를 설정하여 측정되었다. 피로균열의 전파속도 계산에는 7 점증분다항법⁽⁵⁾ (Seven Point Incremental Polynomial Method)이 사용되었다.

수정 CTS 시험편의 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 는 Richard⁽⁶⁾가 제안한 식 (1)을 이용하여 계산되었다.

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

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

$$f_I\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{1}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{0.26 + 2.65 \frac{a}{W-a}}{1 + 0.55 \frac{a}{W-a} - 0.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}}$$

$$f_{II}\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{1}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.40 \frac{a}{W-a}}{1 - 0.67 \frac{a}{W-a} + 2.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}}$$

여기서 a 는 피로균열의 길이이며, ϕ 는 하중작용각도를 나타낸다. 초기 균열평면상의 임의 지점에 위치하는 균열에 대한 평가방법에는 전파균열을 기준좌표평면의 x 축에 회전시킨 실제 균열길이와 유효하중작용각도(ϕ_{eff})를 적용하는 방법이 사용되었다. 균열전파속도의 평가를 위하여 K_I 과 K_{II} 를 조합한 유효응력확대계수(K_{eff})가 도입되었으며, 이에 대한 산출에는 Tanaka⁽⁷⁾가 제안한 식이 이용되었다.

$$\Delta K_{\text{eff}} = [\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4]^{1/4} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 피로균열의 전파 양상

본 절에서는 예비균열과 일직선상에 원공 결함이 위치하는 경우, 각각 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 나타나는 피로균열의 전파거동에 대한 특징을 검토하고자 하였다. 실험의 용이한 해석과 결과를 비교하기 위하여 예비균열 선상에 원공 결함의 지름은 고정시키고, L 은 변화시키면서 실험하였다. 피로균열의 전파양상은 원공 결함을 전후로 하여 H-I 과 H-II 구간으로 구분하였다. Fig. 4 와 Fig. 5 에는 각 조건에서의 전파양상을 나타내었다.

우선 Fig. 4 에는 $L=0.9\text{mm}$ 인 경우의 전파양상을 나타내었다. (a)는 하중작용각도 $\phi=30^\circ$ 일 때, (b)는 $\phi=60^\circ$ 일 때 관찰된 피로균열의 전파양상이다. (a) 와 (b) 모두 H-I 구간에서 피로균열은 원공 결함의 영향으로 하중작용각도와 관계없이 원공으로 빠르게 진전하여 합체하였다. 이후 H-II 구간에서는 원공중심에 대하여 (a)의 경우 19° 의 위치에서, (b)의 경우 55° 의 위치에서 피로균열이 발생하여 지속적으로 전파하였다.

$L=1.6\text{mm}$ 의 경우, 피로균열의 전파양상은 Fig. 5 와 같다. Fig. 5 (a)는 $\phi=30^\circ$ 일 때 관찰된 피로균열의 전파양상을 나타낸 것이다. 피로균열은 작용하중과 거의 수직인 방향 (27°)으로 0.5mm 진전하다

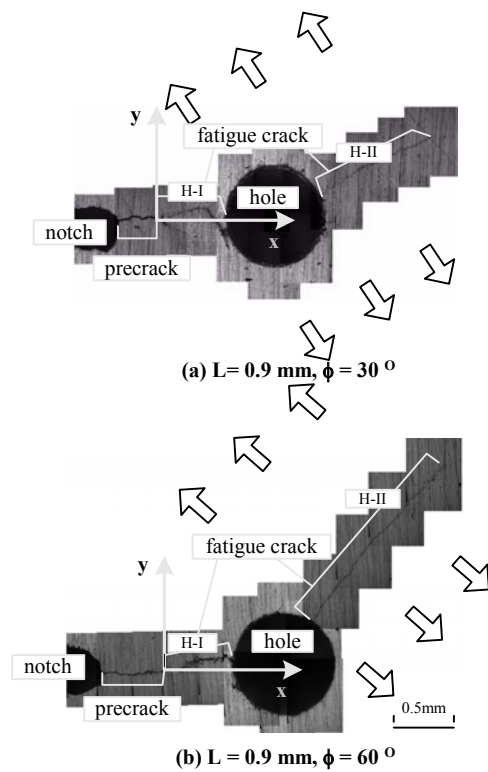


Fig. 4 Aspect of crack propagation in pre-cracked specimen ($L=0.9\text{mm}$)

가 원공의 영향으로 전파방향이 급격히 바뀌었고 결국 원공과 합체되었다. 이후 원공 중심에 대하여 33° 의 위치에서 피로균열이 발생하여 지속적으로 전파하였다. Fig. 5 (b)는 $\phi=60^\circ$ 일 때 관찰된 피로균열의 전파양상이다. 피로균열은 혼합모드 I+II 하중 하에서 0.6mm 진전하다 A 영역에서 전파방향이 약간 변화를 보인 후 초기의 전파방향으로 회복하였다. 이는 원공에 의한 영향으로 판단되며, 향후 혼합모드 하중 하에서 전파하는 균열에 영향을 미치는 원공 결함의 위치와의 관계에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 생각된다.

원공 결함이 있는 혼합모드 하중 하의 피로균열의 전파양상은 H-I 구간에서는 원공의 영향으로 인해 균열의 전파방향이 크게 변화하였고, 빠르게 전파하였고 H-II 구간에서는 하중작용각도에 따라 원공중심으로부터 일정한 위치에서 피로균열이 발생하여 지속적으로 전파하였다.

3.2 피로균열의 전파거동

$L=0.9\text{mm}$ 이고 원공 결함을 갖는 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 피로균열의 수명과 전파속도를 원공 결함이 없는 경우의 피로거동과 비교하여 Fig. 6 과 같이 나타내었다. Fig. 6 (a)는 피로균열

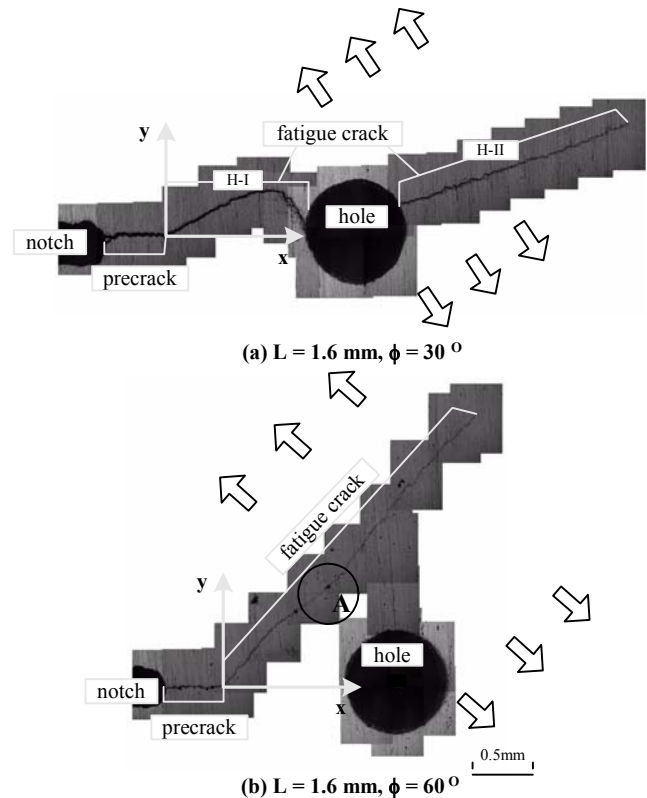
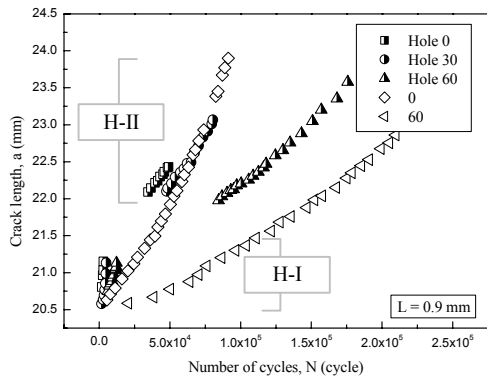


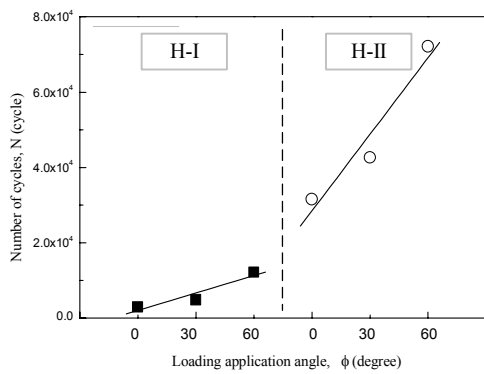
Fig. 5 Aspect of crack propagation in pre-cracked specimen ($L=1.6\text{mm}$)

의 전파길기와 하중반복수와의 관계를 나타내고 있다. H-I 구간에서 피로균열의 전파거동은 예비균열 앞의 원공에 의한 영향으로 원공이 없는 경우의 전파거동과는 현저한 차이를 보이고 있다. H-II 구간에서는 원공이 없는 경우와 유사한 거동을 보이며 피로균열은 일정하게 전파하였다. Fig. 6 (b)는 하중작용각도의 변화에 따른 피로수명의 관계를 나타내고 있다. H-I 구간은 피로균열이 전파하다 원공에 들어갈 때까지의 수명이고, H-II 구간은 원공에서의 피로균열 발생수명을 나타낸 것이다. 비교 결과, H-I 구간에서는 원공의 영향으로 피로균열이 빠르게 전파하였다. Fig. 6 (c)는 균열길이 증가에 따른 균열의 전파속도를 원공의 유무와 하중작용각도에 따라 나타낸 것이다. H-I 구간과 H-II 구간의 피로균열 전파속도가 차이를 보였다. H-II 구간 비해 H-I 구간의 피로균열 전파속도는 불규칙하고 빠르게 나타났다. H-II 구간의 피로균열 전파속도는 하중작용각도의 변화에 따라 일정한 차이를 보였다.

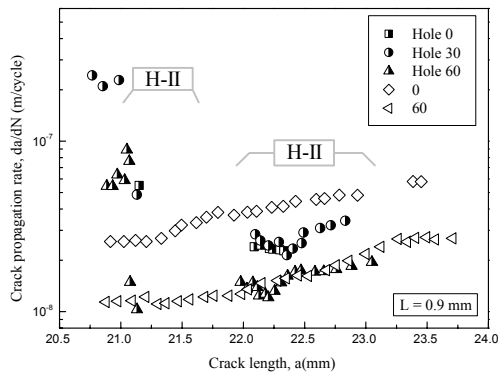
예비균열 선단에서부터 원공중심까지의 거리(L)를 1.6mm 로 변화시켜 균열의 피로수명과 전파속도에 대하여 비교 고찰하였다. Fig. 7 (a)는 피로균열의 전파길기와 하중반복수와의 관계를 나타내



(a) Relationship between a and N



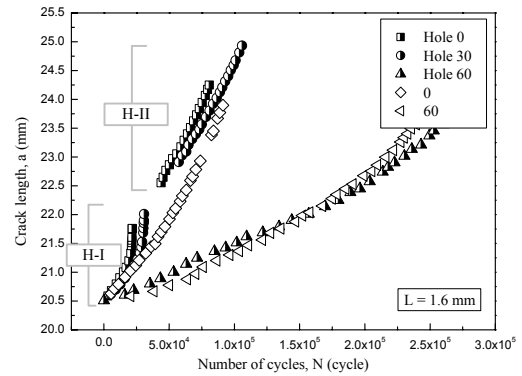
(b) The fatigue life with the variation of loading application angle



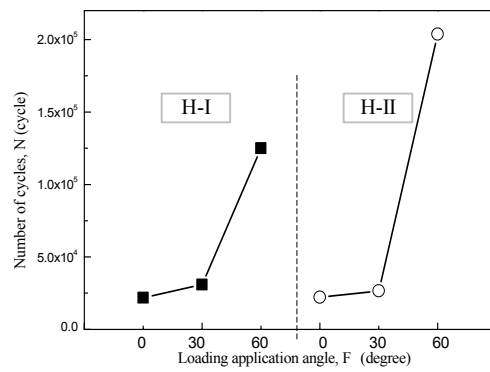
(c) Relationship between da/dN and a

Fig. 6 The fatigue crack behavior (L=0.9mm)

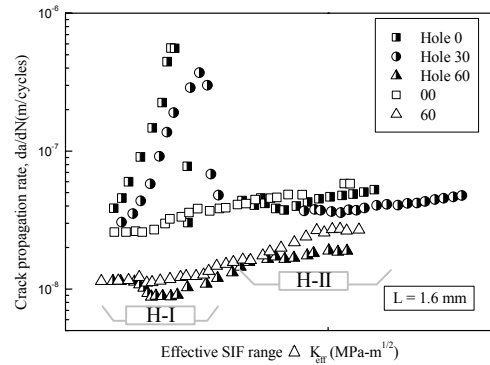
고 있다. 하중작용각도 $\theta=0^\circ, 30^\circ$ 일 때 H-I 구간에서 피로균열은 일정하게 전파하다 예비균열 앞의 원공에 의한 영향으로 피로균열의 전파속도가 빨라지는 거동을 보이고, H-II 구간에서는 원공으로부터 발생한 피로균열이 일정하게 전파하였다. $\theta=60^\circ$ 인 경우는 피로균열이 전파하다 원공과의 간섭효과로 인하여 균열의 전파속도가 약간의 감소하는 구간이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 7 (b)는 하중작용각도의 변화에 따른 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. L=0.9mm의 조건일 때의 Fig. 6 (b)



(a) Relationship between a and N



(b) The fatigue life with the variation of loading application angle



(c) Relationship between da/dN and ΔK_{eff}

Fig. 7 The fatigue crack behavior (L=1.6mm)

에 나타난 피로수명의 변화와 달리 L=1.6mm 일 때 피로수명의 변화는 다른 양상을 나타내었다. 이 중에서 $\theta=60^\circ$ 의 경우 피로수명은 $\theta=0^\circ, 30^\circ$ 의 경우와 큰 차이를 보였는데 이는 L이 증가하여 원공이 피로균열의 전파거동에 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다. 또한 원공에 의한 영향이 감소하여 H-I 구간과 H-II 구간에서 균열의 피로수명은 하중작용각도의 변화에 따라 유사한 변화를 나타내고 있다. 여기서 $\theta=60^\circ$ 의 경우, 피로균열이 원공과 합체하지 않아 피로수명은 예비균열선단에서

의 균열의 전파길이를 계산하여 원공으로부터 발생하는 균열의 위치와 유사하게 산정하여 설정하였다. Fig. 7(c)는 원공의 유무와 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서의 전파속도를 비교하였다. $\theta=0^\circ$, 30° 인 경우 H-I 구간에서 피로균열의 전파속도는 증가하였으며, 원공과 합체하는 과정에서 원공의 영향으로 불규칙한 전파속도의 변화를 나타내었다.

한편, H-II 구간에서는 원공으로부터 발생한 피로균열의 전파속도는 원공이 없는 경우에 비해 다소 느리게 나타났지만 불규칙한 전파속도를 나타내지는 않았다. $\theta=60^\circ$ 의 경우는 $\theta=0^\circ$, 30° 인 경우와 달리 원공과 합체하지는 않았지만 원공의 영향으로 전파과정 중 일시적인 전파속도의 감소현상이 나타남을 확인하였다. 이후 혼합모드 하중 하에서 전파하는 피로균열과 원공의 위치 변화에 따른 전파속도의 변화를 고찰이 필요하다고 생각된다.

본 절에서는 원공의 유무와 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중 하에서 피로균열의 전파거동에서의 차이가 분명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 원공 결함의 존재와 그 위치의 변화에 따라 혼합모드 피로균열의 전파거동에 나타나는 변화를 일차적으로 나타난 실험결과로써 고찰하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 CTS 시험편을 이용하여 예비균열과 일직선 상에 원공 결함이 위치하는 경우에 혼합모드 하중 하에서 나타나는 피로균열의 전파거동을 고찰하였다. 피로시험은 예비균열 선단에서부터 원공중심까지의 거리와 하중작용각도를 변화시키면서 모드 I ($\theta=0^\circ$) 및 혼합모드 I+II($\theta=30^\circ$, 60°) 하중 하에서 수행되었다. 그리고 이 결과를 상호 비교함으로써 원공결함을 가진 혼합모드 피로균열의 전파거동에 대하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 예비균열의 선단과 원공중심까지의 거리 L 을 변화시킨 $L=0.9\text{mm}$ 와 $L=1.6\text{mm}$ 의 경우 피로균열의 전파에 위치한 원공 결함의 영향으로 피로균열의 전파방향은 변화하여 원공과 합체하였다. 이후 혼합모드 하중 하에서 피로균열은 원공으로부터 발생하여 하중작용각도의 변화에 따라 일정한 차이를 보이며 지속적으로 변화하였다. 이 중에서 $L=1.6\text{mm}$ 와 $\theta=60^\circ$ 인 실험조건의 경우 피로균열은 전파 초기에 원공 결함의 직접적인 영향을 받지 않아 전파하면서 원공 결함과 합체하지 않았다. 하지만 원공 결함과 인접한 영역을 전파하는 동안에는 그의 영향을 받아 일정한 구간 동안 전파방

향이 변하는 거동을 나타내었다.

(2) 피로수명은 하중작용각도와 원공의 존재에 의하여 변화하는 양상을 나타내었다. $L=0.9\text{mm}$ 의 경우와 같이 원공의 영향을 크게 받을 때 피로수명은 하중작용각도의 변화에 대해서 선형적인 변화를 나타내었다. 반면 $L=1.6\text{mm}$ 의 경우, 피로수명은 원공 결함의 영향을 상대적으로 적게 받아 하중작용각도의 변화에 의한 영향으로 더 큰 변화를 나타내었다. 전파속도의 변화는 원공의 영향에 의하여 H-I 구간에서는 불규칙한 변화를 나타내었지만 H-II 구간에서는 하중작용각도의 변화에 따라 안정적이고 일정한 차이를 보였다. 특히 전파하는 피로균열이 원공 결함과 합체하지 않는 경우, 피로균열의 전파속도는 피로균열이 전파과정 중 원공과 가장 인접한 구간에서 감소하였다가 회복하는 양상을 나타내었다. 이는 혼합모드 응력장에서 원공 결함의 간섭으로 인하여 나타나는 거동으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Sam-Hong Song and Jin-Bong Kim, 1994, "A Study of Stress Analysis and Interaction of Stress between Micro Flaws and Inclusions," *Transaction of the KSME*, Vol. 18, No. 3, pp. 555~564.
- (2) Sam-Hong Song and Joon-Soo Bae, 1997, "Fatigue Crack Initiation and Propagation from Two Micro Hole Defects," *Transaction of the KSME*, Vol. 21, No. 5, pp. 842~849.
- (3) Sam-Hong Song, Byoung-Ho Choi and Joon-Soo Bae, 1997, "Variation of Fatigue Crack Propagation Behavior based on the Shape of the Interaction Between Two Cracks," *Transaction of the KSME*, Vol. 21, No. 7, pp. 1097~1105.
- (4) H. A. Richard and K. Benitz, 1983, "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *International Journal of Fracture*, Vol. 22, pp. R55 ~ R58.
- (5) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 565 ~ 601.
- (6) Richard H. A., 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337~3344.
- (7) Keisuke Tanaka, 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 493 ~ 507.