

단일과대하중의 작용모드가 피로균열의 전파거동에 미치는 영향

송삼홍*, 이정무#

Effects by Applying Mode of Single Overload on Propagation Behavior of Fatigue Crack

Sam Hong Song* and Jeong Moo Lee#

ABSTRACT

In this study, when variable-amplitude load with various applying mode acts on the pre-crack tip, we examined how fatigue cracks behave. Hence aspects of the deformation caused by changing the applying mode of single overload and propagation behavior of fatigue crack were experimentally examined: What kinds of the deformation would be formed at pre-crack and its tip? What aspects of the residual plastic deformation field would be formed in front of a crack? How aspects of the plastic zone could be evaluated? As applying mode of single overloading changes, the deformation caused by tensile and shear loading variously showed in each applying mode. The different aspects of deformation make influence on propagation behavior of cracks under constant-amplitude fatigue loading after overloading with various modes. We tried to examine the relationship between aspects of deformation and fatigue behavior by comparing the observed deformation at crack and crack propagation behavior obtained from fatigue tests.

Key Words : Single overload(단일과대하중), Mixed mode(혼합모드), Applying mode(작용모드), Shear components (전단성분), Residual plastic deformation field(잔류소성변형장), Retardation(지연)

1. 서론

기계요소나 공학 구조물이 사용 중에 받는 반복하중은 지속적으로 변화한다. 반복하중의 작용 크기가 변하거나 성분이 변화하여 사용 중에 작용하는 하중상태는 복합적으로 변화하는 양상을 나타낸다. 그러므로 변동진폭 하중 하에서의 피로수명 예측에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다.¹ 또한 사용환경과 설계조건 복잡성 및 다양

성이 점차적으로 증가함으로써 유발되는 혼합모드 하중상태 하에서의 피로거동에 관한 연구도 폭넓게 이루어지고 있는 실정이다.²

실제 기계요소나 공학 구조물들은 이처럼 변동진폭 하중 및 혼합모드 하중상태 하에서 운전되기 때문에 진폭의 변동을 갖는 하중이력에 의한 하중상호작용효과(load interaction effect)와 혼합모드 하중에 의한 영향에 대하여 종합적인 검토가 이루어져야 한다고 생각된다.³ 변동진폭 하중모델에서

접수일: 2003년 12월 3일; 게재승인일: 2004년 3월 12일

* 고려대학교 공과대학 기계공학과

교신저자, 고려대학교 공학기술 연구소

Email icrav215@korea.ac.kr Tel. (02) 928-3608

Table 1 Chemical composition of SAPH440

Compositions (wt. %)				
C	Si	Mn	P	S
0.168	0.020	0.810	0.012	0.008

Table 2 Mechanical properties of SAPH440

Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Micro Vickers hardness Hv	Elongation %
302	440	214	44

피로균열의 거동에 관한 대부분의 연구들은 변동진폭 하중과 일정진폭 하중의 작용모드가 동일한 경우에 대하여 수행되어왔다. 모드 I의 변동진폭 하중과 이후 모드 I의 일정진폭 피로하중으로 구성된 실험조건에 대하여 대부분 수행되어 왔다. 그리고 이들 중 상당부분은 과대하중으로 인한 균열의 지연성장(crack retardation)과 이를 설명하기 위한 지연기구(retardation mechanism)들에 대하여 보고하고 있다.^{4,5,6} 하지만, 변동진폭 하중의 작용모드가 변화하는 경우 이후 수반되는 일정진폭 피로하중 하의 균열전파거동에 미치는 영향은 변동진폭 하중과 일정진폭 하중 사이의 작용모드관계에 따라 예기치 못한 상황을 일으킬 수 있다. 이와 같이 변동진폭 하중과 그것의 작용모드 변화가 피로균열의 거동에 미치는 영향을 함께 고려한 연구는 더욱 복잡하고 다양하게 변화되고 있는 사용환경의 증가추세에서 아직 부족한 형편이다. 그러

므로 변동진폭 및 혼합모드가 조합된 하중상태 하의 피로수명을 예측하기 위한 기본적인 연구자료의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 변동진폭 하중의 모델로 단일과대하중을 설정하였으며, 이의 작용모드를 변화시킨 후 모드 I 일정진폭의 피로하중 하에서 전파하는 균열의 거동에 관하여 실험적으로 고찰하고자 하였다. 단일과대하중의 작용모드 변화가 피로균열의 전파거동에 미치는 영향은 과대하중에 의한 변형장과 피로균열의 거동을 관계시킴으로써 고찰하였다. 작용하는 단일과대하중의 인장과 전단성분의 변화로 인하여 유발되는 균열전단의 변형 및 균열전방 변형장의 양상이 고찰되었으며, 근사적으로 혼합모드 I+II 과대하중 소성영역의 형상과 크기가 계산되었다. 다양한 모드의 단일과대하중을 작용시킨 후 모드 I 피로균열의 전파거동에 나타나는 거동의 양상을 고찰하였다. 그리고 단일과대하중으로 인한 변형양상과 모드 I 피로균열의 전파거동 사이의 관계를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 자동차 구조용 열간 압연강판(SAPH440)이다. 이 재료는 주로 자동차의 프레임 및 차체와 차륜의 상하방향 지지와 강성을 유지하는 현가장치의 상/하 암에 사용되며, 프레스 가공성과 용접성이 우수하다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

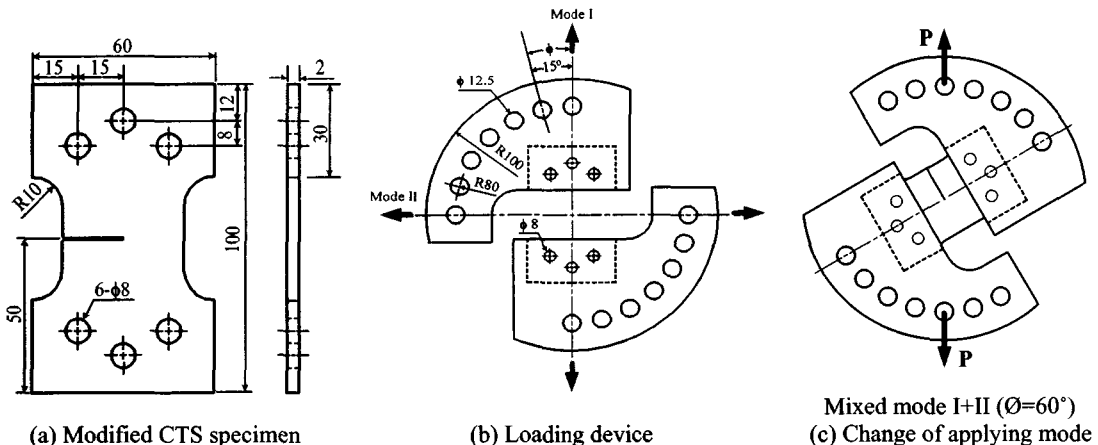


Fig. 1 The specimen and loading device used in this experiment

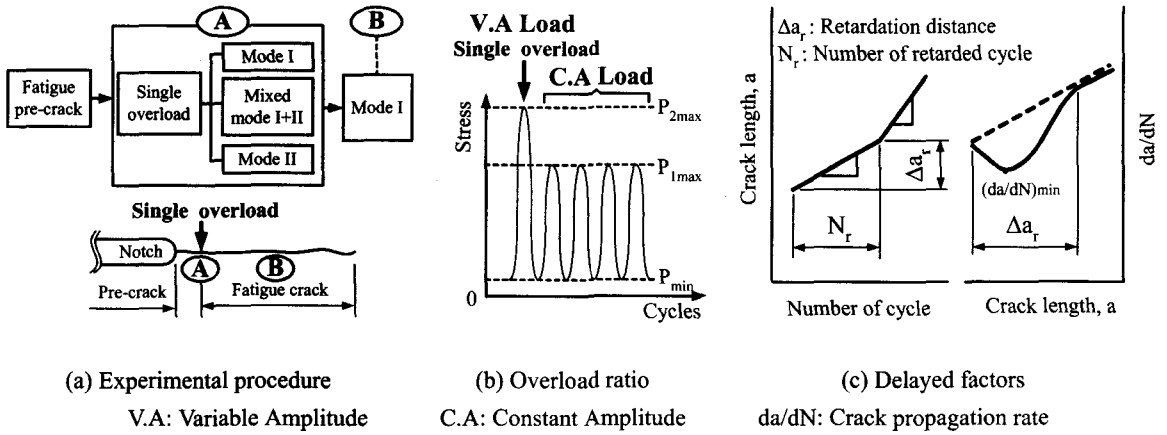


Fig. 2 The experimental procedure and definition of overload ratio, delayed factors

2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 단일과대하중의 작용모드를 다양하게 변화시키기 위하여 수정된 단순인장전단(compact tension shear: CTS)시험편과 하중장치를 사용하였다.⁷ 이의 형상과 치수는 Fig. 1 과 같다.

하중장치는 핀 홀의 각도변화에 따라 피로시험기의 단축 인장하중으로 시험편에 다양한 혼합 모드 하중상태를 조성할 수 있도록 제작되었다. 하중장치를 이용하여 균열선단에 작용하는 하중의 방향을 변화시킴으로써 인장과 전단하중이 작용되는 비율을 조절하여 하중의 작용모드를 변화시켰다. 하중작용각도(θ)가 0° 는 모드 I, 90° 는 모드 II의 하중상태를 나타낸다. 이 두 하중작용각도 사이의 상태는 혼합모드 I+II의 하중상태이다.

2.3 실험방법

본 실험에서는 Fig. 2 에 나타난 것처럼 예비균열선단에 하중의 작용모드를 변화시킨 변동진폭 하중을 작용시킨 후 일정진폭의 모드 I 피로하중 하에서 전파하는 피로균열의 거동을 관찰하였다.

변동진폭 하중모델로는 단일과대하중이 적용되었으며, 과대하중의 작용모드를 다양하게 변화시키는 방법을 사용하였다. 단일과대하중의 크기는 식 (1)의 과대하중비(overload ratio %, R_{OL})를 사용하여 정의하였다.

$$R_{OL}(\%) = \frac{P_{2max} - P_{1max}}{P_{1max}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, P_{1max} 는 일정진폭 피로하중의 최대 하중이고, P_{2max} 는 단일과대하중의 최대 하중이다. 과대하중비 R_{OL} 은 100%로 고정되었으며, 단일과대하중으로 적용된 하중모드는 각각 모드 I($\theta=0^\circ$), 혼합모드 I+II($\theta=30^\circ, 60^\circ$) 및 모드 II($\theta=90^\circ$)의 상태로 다양하게 구성되었다.

단일과대하중은 Fig. 2(a)와 같이 이미 전파한 피로균열의 전파경로에 대한 영향을 줄이기 위하여 예비균열선단($a=19.5$ mm)에 작용시켰으며, 작용주파수의 크기는 0.02 Hz 이다.

피로시험은 단일과대하중을 작용시킨 후 일정진폭의 하중 하에서 수행되었다. 피로하중은 최대크기(P_{1max})가 3.6 kN, 응력비는 0.5 이며, 10 Hz 의 Sine 파형을 갖는 인장-인장하중상태이다. 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로 시험기인 INSTRON 1331 이다. 본 실험의 조건은 각각 모드 I, 혼합모드 I+II, 모드 II 의 다양한 단일과대하중조건과 모드 I($\theta=0^\circ$)상태의 일정진폭 피로하중으로 조합되었다. 이들의 실험결과는 과대하중을 부하하지 않은 일정진폭 모드 I 피로하중 조건하의 결과와 비교되었다.

단일과대하중 작용 후 각각의 모드변화에 따라 나타나는 예비균열 자체와 그 선단의 변형은 주사형 전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 관찰되었다. 또한 예비균열 전방에 형성된 표면의 잔류소성변형은 광학현미경을 이용하여 변형윤곽의 형상과 크기를 파악하였다. 피로균열의 전파길이와 위치는 예비균열선단에 설

정한 기준좌표계를 중심으로 하여 균열이미지 캡처링 시스템으로 측정하였다. 피로균열의 전파속도는 7점 증분 다항법(seven point incremental polynomial method)으로 계산되었다.

수정 CTS 시험편의 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 는 Richard 와 Benitz 가 제안한 식 (2)를 이용하여 계산하였으며, 이는 혼합모드 I+II 과대하중의 소성역을 계산하는데 이용되었다.⁸

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \cos \phi \frac{1}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{0.26 + 2.65 \frac{a}{W-a}}{1 + 0.55 \frac{a}{W-a} - 0.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}}$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{Wt} \sin \phi \frac{1}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.40 \frac{a}{W-a}}{1 - 0.67 \frac{a}{W-a} + 2.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (2)$$

여기서 a 는 초기균열(노치+예비균열)과 피로균열을 합친 길이이며, ϕ 는 하중작용각도를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일과대하중에 의한 변형양상

본 절에서는 예비균열에 단일과대하중의 작용모드를 변화시켰을 때 나타나는 예비균열과 그 주위의 변형양상에 관하여 고찰하였다.

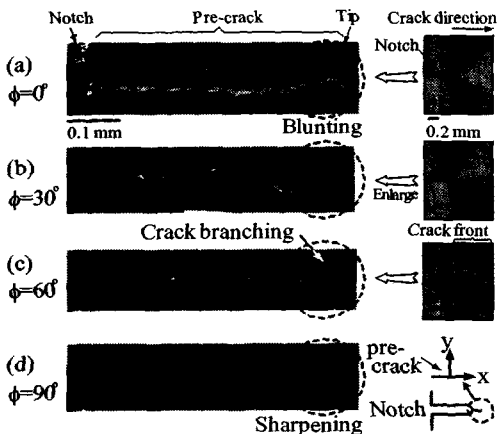


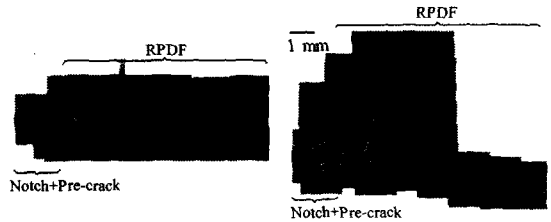
Fig. 3 The deformation at the pre-crack

3.1.1 예비균열의 변형양상

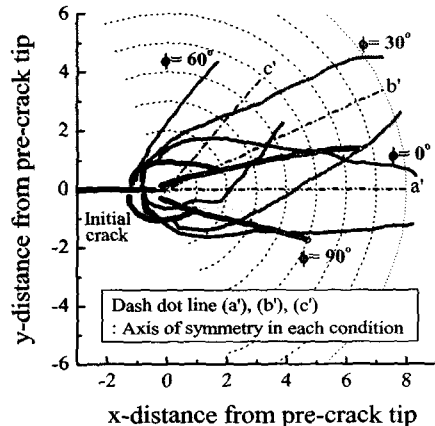
단일과대하중의 작용으로 예비균열에서 발생한 변형은 Fig. 3 에 나타내었다. 변형은 단일과대하중의 작용모드 변화에 따라 균열면 사이의 변위에서 차이를 나타내었다.

과대하중의 인장성분에 의하여 발생하는 균열면 사이의 열림변위는 균열선단을 둔화시킨 반면, 전단성분에 의한 미끄럼변위는 균열선단을 예리하게 하였다(Fig. 3(a), (d)). 혼합모드 I+II 단일과대하중의 경우는 혼합모드의 정도에 따라 열림과 미끄럼 변위량이 변화하여 균열의 변형양상에 차이를 보였다. 미끄럼 변형은 전단성분이 증가함에 따라 변형과정 동안 예비균열의 형상에 대한 영향을 받아 균열면 사이의 마찰을 수반하며, 또한 부분적으로 균열가지 현상을 유발하였다(Fig. 3(b), (c)).

결과적으로 단일과대하중의 전단성분 증가에 따른 균열선단의 예리화는 높은 응력집중을 유도하여 피로균열의 지연성장애 대한 과대하중의 영



(a) The deformation areas obtained from a microscope



(b) Contours of RPDFs

Fig. 4 Contours of residual plastic deformation field (RPDF)

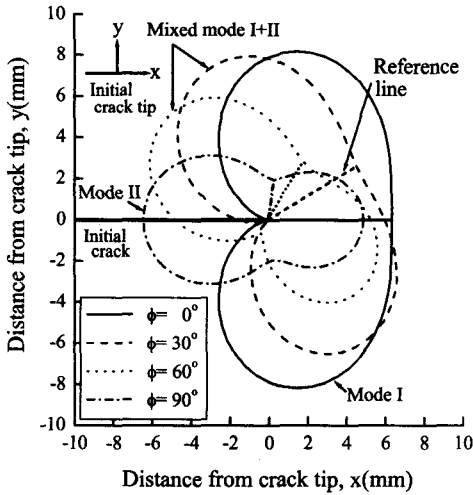


Fig. 5 The shape and size of overload plastic zones

향을 감소시킨다. 또한 단일과대하중의 작용모드 변화는 균열선단을 둔화시키거나 예리하게 만들고, 이러한 작용하중의 성분변화와 균열선단의 변형은 균열전방의 잔류소성변형장의 형성과 피로균열의 전파거동에도 영향을 미치게 된다.

3.1.2 예비균열 전방의 변형양상

단일과대하중의 작용으로 인하여 시험편의 표면에 형성된 균열전방의 잔류소성변형장(residual plastic deformation field, RPDF)의 형상은 Fig. 4(a)와 같이 관찰된 변형영역의 사진으로부터 얻은 외형 윤곽선으로 나타내었다(Fig. 4(b)). 과대하중의 작용모드 변화에 따라 형상과 크기에서 차이를 보이는 잔류소성변형장의 윤곽선은 균열전방의 변형장이 형성된 방향을 나타내고 있다.

모드 I($\theta=0^\circ$)과 모드 II($\theta=90^\circ$) 과대하중이 작용한 경우, 잔류소성변형장은 기준좌표계의 x 축을 중심으로 대칭형상으로 형성되었다. 혼합모드 I+II ($\theta=30^\circ, 60^\circ$)과대하중의 경우, 변형장은 x 축으로부터 회전한 축(b', c')을 중심으로 대칭으로 형성되었으며, 전단하중 성분이 증가할수록 축의 회전각도는 하중작용각도와 일치하지 않고 감소하였다. 또한 잔류소성변형장의 윤곽선 크기와 두께방향으로의 변형량도 감소하였다.

과대하중의 작용모드 변화에 따라 상이하게 형성된 잔류소성변형장의 양상은 이후 피로하중 하의 균열전파거동에 영향을 미치게 된다.

3.1.3 혼합모드 I+II 과대하중의 소성역 평가

시험편의 표면에서 관찰된 잔류소성변형장과 비교하기 위하여 각 작용모드에서 과대하중에 의한 소성역이 계산되었다. 단일과대하중의 작용성분 변화에 따라 예비균열선단에 수반되는 소성역의 크기와 형상은 Von-Mises 항복조건을 이용하여 평가되었다. 평면응력조건에 대한 소성역의 크기와 형상은 다음의 식으로 평가될 수 있다.⁹

$$r_p(\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_{ys}^2} \left[\begin{aligned} &K_I^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(1 + 3 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \\ &+ K_I K_{II} \sin \theta (3 \cos \theta - 1) \\ &+ K_{II}^2 \left\{ 3 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \left(1 - 9 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \right\} \end{aligned} \right] \quad (3)$$

여기서 $r_p(\theta)$ 는 균열선단의 평면좌표계에 대한 각도별 소성역의 반경이며, K_I 과 K_{II} 는 작용모드별 모드 I 과 모드 II 의 응력확대계수를 나타낸다.

식 (3)을 이용하여 근사적으로 계산한 단일과대하중 소성역의 형상과 크기는 Fig. 5 에 각 작용모드 별로 나타내었다. 참고선은 균열선단의 전방 방향으로 가장 짧은 소성역의 반경을 나타낸다.

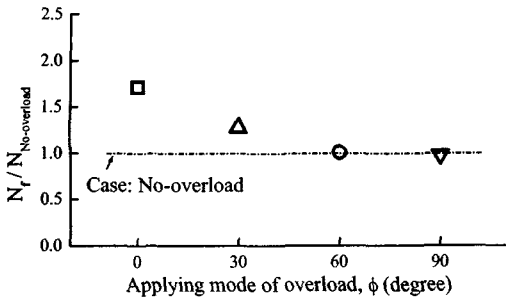
시험편 표면을 고려한 평면응력조건에 대하여 소성역은 관찰된 잔류소성변형장과 마찬가지로 혼합모드 I+II 과대하중의 전단성분이 증가할수록 초기 균열선에 대하여 회전한 축을 중심으로 점차 비대칭으로 형성되었다. 혼합모드 I+II 과대하중 소성역의 크기는 모드 I 하중일 때의 것과 비교해서 상대적으로 감소하였다. 과대하중의 작용모드 변화에 따른 과대하중 소성역의 변화는 압축잔류응력의 작용방향과 크기 및 피로균열의 전파거동에 상이한 영향을 미칠 것임을 암시한다.

3.2 과대하중에 의한 균열 전파거동의 변화

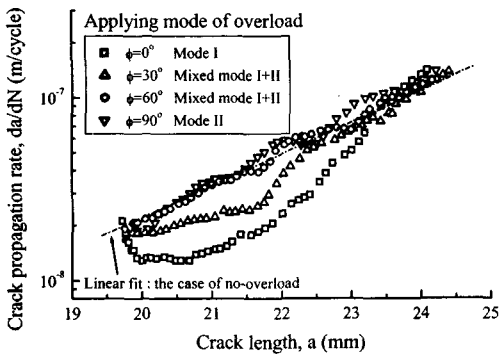
본 절에서는 작용모드를 변화시킨 단일과대하중이 피로균열의 전파거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 모드 I 일정진폭 하중 하에서 전파하는 피로균열의 거동을 고찰하였다(Fig. 6).

3.2.1 모드 I 일정진폭 하중 하의 피로거동

단일과대하중의 작용모드 변화에 따른 피로수명의 변화를 비교하였다. 피로수명은 균열의 길이가 5 mm 될 때의 하중반복수로 정의하였으며, 각각 과대하중을 부하하지 않은 경우로 정규화한 피



(a) Comparison of fatigue life



(b) Crack propagation rate

Fig. 6 The variation of fatigue behavior caused by various overload mode

로수명은 Fig. 6(a)에 나타내었다. 다양한 단일과대하중을 작용시킨 이후 모드 I 일정진폭하중 하의 피로수명은 과대하중의 작용성분과 이에 기인하는 영향으로 변화하였다.

피로수명은 모드 I, 혼합모드 I+II, 모드 II 단일과대하중 조건의 순서로 길게 나타났다. 과대하중을 작용시키지 않은 경우의 수명과 비교하여 모드 I 과대하중의 경우는 약 1.7 배의 증가를 보였다. 하지만 과대하중의 전단성분이 증가할수록 피로수명의 증가량은 감소하였으며, 혼합모드 I+II ($\theta=60^\circ$)와 모드 II($\theta=90^\circ$)의 경우에는 과대하중의 작용으로 인한 수명의 증가가 거의 나타나지 않았다. 이러한 모드 II 과대하중의 실험결과는 균열전파속도에 미치는 모드 II 과대하중의 영향이 모드 I의 경우에 비하여 작지만 지연효과가 더 긴 구간에서 나타나 회복거리가 길어진다는 연구결과³와 일치하지 않는 결과를 나타내었다.

단일과대하중의 작용에 의하여 피로수명이 크게 증가한 경우는 실험조건 중에서 단일과대하중

과 피로하중의 작용모드가 동일한 경우인 모드 I 단일과대하중의 조건으로 나타났다. 단일과대하중 작용 후 모드 I 피로하중 하에서 관찰되는 균열의 지연거동은 과대하중의 작용방향과 그에 따른 성분변화로부터 기인하는 영향들을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 과대하중의 전단성분이 증가함에 따라 나타나는 지연거동의 감소는 균열선단의 변형 및 균열전방에 형성되는 잔류소성변형장의 형상과 관련이 있다. 과대하중의 전단성분이 (i)균열선단을 예리하게 하여 응력집중을 초래하고, (ii)균열전방에 비대칭 형상의 소성역을 형성하여 전파하는 모드 I 피로균열에 작용하는 압축잔류응력을 상대적으로 감소시키는 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같은 지연거동의 원인에 대한 정량적 측정과 검토가 필요하다고 생각된다.

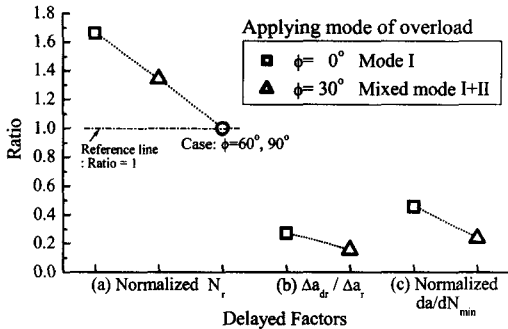
결과적으로, 작용하중의 전단성분이 증가하는 혼합모드 I+II ($\theta=60^\circ$)와 모드 II 과대하중의 작용으로 인한 변화는 모드 I 피로하중의 균열진전력을 감소시키지 못하였다. 그러므로 피로수명의 예측에 있어서 전단성분이 큰 혼합모드 I+II 와 모드 II 과대하중의 작용에 대해서는 지연효과를 기대할 수 없으며, 이로 인하여 예측의 부정확성을 초래할 수 있음을 확인하였다.

3.2.2 단일과대하중에 의한 지연인자의 변화

단일과대하중의 작용모드 변화에 따른 피로균열의 전파거동을 고찰한 결과 모드 I ($\theta=0^\circ$)과 혼합모드 I+II ($\theta=30^\circ$) 과대하중의 경우에만 과대하중에 의한 피로균열의 지연성장효과가 나타났다. 본 절에서는 이 두 경우에서 나타난 지연인자의 변화를 고찰함으로써 과대하중의 전단성분 증가에 따른 지연거동과 그 변화의 특징을 고찰하였다.

작용모드의 변화에 따라 두 조건($\theta=0^\circ, 30^\circ$)에 대하여 비교된 지연인자는 Fig. 7에서 나타내었다. 지연인자는 (a)정규화된 지연반복수(N_r), (b)단일과대하중에 의한 지연구간(Δa_r)에 대하여 최저균열전파속도까지 전파율이 감소하는 구간의 비($\Delta a_{dr} / \Delta a_r$)와 (c)과대하중 작용시점의 균열전파속도로 정규화된 최소균열전파율(da/dN_{min})이다.

피로수명의 변화(Fig. 6(a))에서 살펴듯이 피로균열의 지연성장효과가 나타난 두 과대하중조건에서 $\theta=0^\circ$ 의 경우는 $\theta=30^\circ$ 의 경우와 비교하여 지연인자들이 약 2 배에 가까운 지연거동을 보이고 있



- Normalized $N_r = N_{r(OL)} / N_{r(No-OL)}$
- Δa_{dr} : Delayed retardation distance
- Δa_r : Retardation distance
- Normalized $da/dN_{min} = da/dN_{min(OL)} / da/dN_{min(OL\ point)}$

Fig. 7 The variation of delayed factors according to the changing overload mode

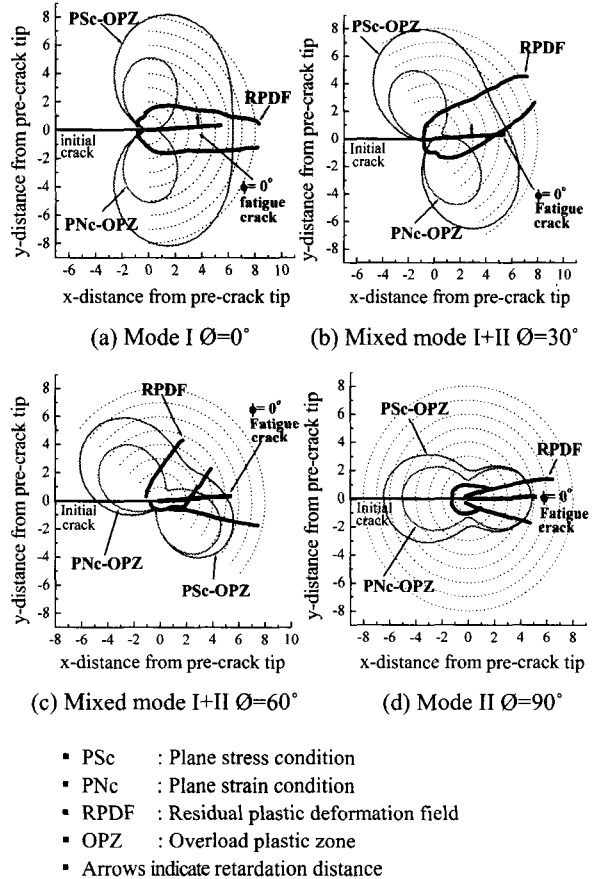
음을 나타내고 있다. 이들의 변화를 보면 지연효과가 나타나지 않은 경우($\phi=60^\circ, 90^\circ$)와도 선형적인 비례관계가 성립할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 그 동안 과대하중의 상대적인 크기변화와 지연인자의 변화가 선형적인 관계를 보인다는 보고 결과와 비교되는 것으로 과대하중의 크기뿐만 아니라 그 성분의 변화도 지연거동과 선형적인 관계를 보일 수 있음을 추정할 수 있다고 하겠다.

3.3 변형장과 균열 전파거동과의 관계 비교

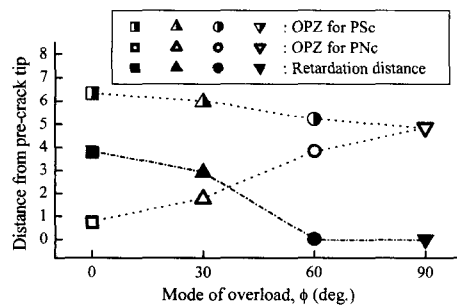
앞 절에서 지연거동의 변화가 과대하중의 성분 에 의한 변형장과 관계가 있음을 추정하였다. 그래서 본 절에서는 변형장과 피로균열의 전파거동에서 관찰된 요소들을 비교함으로써 단일과대하중의 작용모드 변화에 따른 관계와 영향에 대하여 고찰하고자 하였다.

단일과대하중의 각 모드 별로 잔류소성변형장과 산출된 소성역(평면응력, 변형률 조건의 경우)을 중첩시키고, 여기에 모드 I 피로균열의 전파경로와 함께 지연구간을 표시하여 Fig. 8 과 같이 나타내었다.

실험에서 관찰된 표면의 잔류소성변형장과 이론적으로 산출된 소성역의 두 변형영역은 형성되는 방향성은 일치하지만 외형의 크기 및 범위와 형상에서는 차이를 보이고 있다. 또한 피로균열의 전파거동과 관계시켜 모드 I 피로균열의 전파경로 상에 존재하는 두 변형장의 형태는 단일과대하중



- PSc : Plane stress condition
- PNc : Plane strain condition
- RPDF : Residual plastic deformation field
- OPZ : Overload plastic zone
- Arrows indicate retardation distance



(e) The variation of OPZ boundary and retardation distance

Fig. 8 The comparisons between factors induced by the mode change of single overload

의 작용모드 별로 다르게 위치하였다. 모드 I 피로균열의 전파경로 상에 위치하는 소성역의 경계와 피로균열의 지연구간은 Fig. 8(e)에 그 변화를 나타내었다. 피로균열의 전파경로방향으로 위치하는

소성역의 범위는 과대하중의 전단성분의 증가에 따라 점진적인 변화만을 나타내고 있지만 지연구간은 급격히 변화하여 $\theta=60^\circ$ 의 과대하중 조건에서는 지연효과가 나타나지 않았다. 이는 균열의 전파경로 상에 위치하는 변형장에 의한 압축잔류응력의 영향이 거의 없이 균열의 진전이 이루어졌음을 의미한다.

균열의 지연길이를 고려할 때 소성변형장 내에서 전파하는 피로균열은 평면응력과 변형을 조건의 중간 조건 하에서 전파한 것으로 생각된다. 하지만 실제 피로균열의 지연거동에 영향을 미치는 영역의 특성은 과대하중으로 형성된 소성변형장의 형상과 피로하중의 작용모드에 의한 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

정확한 피로수명의 예측과 평가를 위하여 과대하중의 작용모드 변화에 의한 균열선단의 변형양상, 피로균열의 전파경로에 형성된 소성변형장의 형상과 피로하중의 작용모드가 종합적으로 고려되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 과대하중의 작용모드가 모드 I 피로균열의 전파거동에 미치는 영향에 대하여 아래와 같은 기초적인 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 작용모드의 변화로 인한 단일과대하중의 전단성분의 증가는 균열선단을 예리하게 하고, 부분적인 균열가지 현상의 유발을 가져오기도 한다. 또한 이러한 작용하중의 성분변화와 균열선단의 변형은 균열전방의 잔류소성변형장의 형성과 피로균열의 전파거동에도 영향을 미치게 된다. 과대하중의 작용모드 변화에 따른 과대하중 소성역의 변화는 압축잔류응력의 작용방향과 크기 및 피로균열의 전파거동에 상이한 영향을 미칠 것임을 암시한다.
- (2) 작용모드의 변화에 의하여 단일과대하중의 전단성분이 증가하는 경우, 모드 I 일정진폭 피로균열의 전파거동에 미치는 과대하중의 지연효과는 감소한다. 이는 과대하중의 전단성분이 (i)균열선단을 예리하게 하여 응력집중을 초래하고, (ii)균열전방에 비대칭형상의 소성역을 형성하여 전파하는 모드 I 피로균열에 작용하는 압축잔류응력을 감소시키는 역할을 하기 때문이다.

- (3) 피로수명의 예측과 평가의 정도를 향상시키기 위해서는 부하된 과대하중의 작용모드에 대한 검토가 고려되어야 한다. 과대하중의 작용모드 변화에 의한 균열선단의 변형양상, 피로균열의 전파경로에 형성된 소성변형장이 피로하중의 작용모드와 함께 종합적으로 고려되어야 한다.

참고문헌

1. Skorupa, M., "Load Interaction Effects During Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading-A Literature Review. Part II: Qualitative Interpretation," *Fatigue Fracture Engineering Materials Structures*, Vol. 22, pp. 905-926, 1998.
2. Qian, J. and Fatemi, A., "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969-990, 1996.
3. Gao, Hua and Fernando, Upl. S., "Effect of Non-Proportional Overloading on Fatigue Life," *Fracture Engineering Materials Structures*, Vol. 19, No. 10, pp. 1197-1206, 1996.
4. Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure in Damage Tolerance in Aircraft Structure," *ASTM STP. 924*, pp. 230-242, 1971.
5. Song, S. H. and Kwon, Y. K., "A Study on Fatigue Crack Retardation and Retardation Mechanism in Variable Loading," *Transaction of the KSPE*, Vol. 14, pp. 76-81, 1997.
6. Jones, R. E., "Fatigue Crack Growth Retardation After Single-Cycle Peak Overload in Ti-6Al-4V Titanium Alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 5, pp. 585-604, 1973.
7. Richard, H. A. and Benitz, K., "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *International Journal of Fracture*, Vol. 22, pp. R55-R58, 1983.
8. Richard, H. A., "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337-3344, 1986.
9. Pook, L. P., "The Effect of Crack Angle on Fracture Toughness," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 3, pp. 205-218, 1971.