

혼합모드 단일과대하중 하에서 피로균열 전파거동의 예측

이정무[†] · 송삼홍^{*}

Prediction of Fatigue Crack Propagation Behavior Under Mixed-Mode Single Overload

Jeong-Moo Lee and Sam-Hong Song

Key Words : Single Overload(단일과대하중), Mixed Mode(혼합모드), Shear Components(전단성분), Residual Plastic Deformation Field(잔류소성변형장), Crack Retardation(지연성장), Load Interaction Effect(하중상호작용효과)

Abstract

In this study, experiments were tried on the mixed-mode I+II single overloading model which changes the loading mode of overload and fatigue load. Aspects of deformation field in front of the crack which is formed by mixed-mode I+II single overloading were experimentally studied. Then the shape and size of mixed-mode plastic zone were approximately calculated. The propagation behavior of fatigue crack was examined under the test conditions combined by changing the loading mode. The behavior of fatigue cracks were greatly affected by shapes of plastic deformation field and applying mode of fatigue load. Accuracy of prediction and evaluation for fatigue life may be improved by considering all aspects of deformation and behavior of fatigue cracks.

1. 서 론

대부분의 공학 요소나 구조물들이 운용 중에 받는 반복피로하중은 지속적으로 또는 주기적으로 변화하여 작용한다. 사용 중 피로하중의 작용성분이나 작용크기가 변하게 되어 기계요소가 받는 하중상태는 복합적인 양상으로 작용하게 되고, 이러한 변화는 요소의 상태나 수명을 예측하기 어렵게 만든다. 그러므로 변동진폭 하중 하에서의 피로수명 예측에 대한 관심과 지속적인 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁾ 또한 점차적으로 운용환경과 설계조건이 복잡하고 다양화 됨으로써 야기되는 혼합모드 하중상태 하에서의 피로거동에 관한 연구도 폭넓게 진행되고 있는 실정이다.⁽²⁾

변동하중에 대한 대부분의 연구들은 모드 I 하

중으로 변동진폭의 크기나 작용 반복수 등을 설정하고, 이후 동일한 모드인 모드 I 일정진폭 피로하중 하에서 수행되어왔다. 하지만 실제 기계요소나 공학 구조물들은 작용하중의 진폭과 함께 작용 성분도 변하는 혼합모드 하중상태 하에서 운전되고 있다. 그렇기 때문에 진폭의 변동을 갖는 하중이력에 의한 하중상호작용효과 뿐만이 아니라 혼합모드 하중이 피로거동에 미치는 영향에 대해서도 종합적인 이해와 검토가 이루어져야 한다.⁽³⁾

변동하중에 대한 연구는 모드 I의 변동진폭 하중과 일정진폭 피로하중으로 구성된 실험조건에 대하여 대부분 수행되어 왔다. 그리고 이들의 대부분은 과대하중으로 인한 균열의 지연성장과 이를 설명하기 위한 지연기구들에 대하여 보고하고 있다.^(4,5,6) 하지만, 변동진폭 하중의 작용모드가 변하는 경우 이후 수반되는 일정진폭 피로하중 하의 균열전파거동에 미치는 영향은 변동진폭 하중과 일정진폭 하중 사이에 관계하는 작용모드에 따라 예상과 다른 상황을 일으킬 수 있다.

이와 같이 변동진폭 하중과 그것의 작용모드 변

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 공학기술연구소
E-mail : icrav215@korea.ac.kr
TEL : (02)921-3834 FAX : (02)921-8532

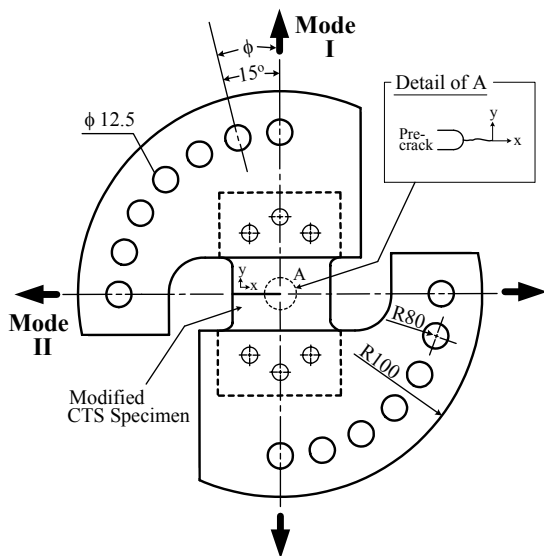
^{*} 회원, 고려대학교 기계공학과

Table 1 Chemical compositions 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	Tensile strength	Hardness	Elongation
MPa	MPa	Hv	%
302	440	214	44

**Fig. 1** The specimen and loading device

화가 요소 및 균열의 피로거동에 미치는 영향을 함께 고려한 연구는 복잡하고 다양하게 변화하는 사용환경의 증가추세에서 아직 부족한 형편이다. 그러므로 변동진폭 및 혼합모드가 조합된 하중상호작용이 피로수명의 예측에 미치는 영향을 검토하기 위한 기본연구자료의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 변동진폭 하중으로 단일과대하중 모델을 설정하였으며, 이의 작용모드를 변화시킨 후 모드 I 과 혼합모드 I+II 일정진폭의 피로하중 하에서 전파하는 균열의 피로거동에 관하여 고찰하였다.

단일과대하중의 작용모드 변화가 모드 I 및 혼합모드 I+II 피로균열의 전파거동에 미치는 영향은 과대하중에 의하여 형성되는 변형장과 피로균열의 거동에 나타나는 결과들을 관계시킴으로써 고찰하였다. 그래서 단일과대하중의 인장과 전단

성분의 조절로 인하여 유발되는 균열전단의 변형 및 균열전방 변형장의 양상이 고찰되었으며, 혼합모드 I+II 과대하중 소성역의 형상 및 그 크기와 비교되었다. 그리고, 단일 및 혼합모드의 단일과대하중과 일정진폭 피로하중으로 조합된 피로균열의 거동 양상에서 나타나는 상호작용의 영향을 고찰하였다. 이상의 고찰결과들을 토대로 변동하중의 작용성분 변화에 의하여 나타나는 하중상호작용을 설명하고, 피로수명을 예측하기 위한 기존모델의 개선에 대한 기초적인 사항들을 검토하였다.

2. 실험

2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 자동차 구조용 열간 압연 강판(SAPH440)이다. 이 재료는 주로 차체 하부구조의 강도를 유지, 보완하는 자동차의 프레임에 사용된다. 또한 프레임을 구성하는 여러 멤버류의 제작 및 결합에 적합하도록 프레스 가공성과 용접성이 우수한 구조용 압연강판이다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1 과 2 에 나타난 것과 같다.

2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 변동하중 및 일정진폭 피로하중의 작용모드를 다양하게 변화시키기 위하여 수정 단순인장전단(modified compact tension shear: CTS) 시험편과 하중장치를 사용하였다.⁽⁷⁾ 시험편과 하중장치를 결합시킨 형상 및 초기균열의 상태는 Fig. 1 에 나타난 것과 같다.

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

2.3 실험방법

변동하중모델로는 단일과대하중을 설정하였다. 과대하중의 크기는 과대하중비(overload ratio %, ROL)를 사용하여 정의하였으며, 그 성분은 하중작용각도(θ)로 표시하여 각각 모드 I($\theta = 0^\circ$), 혼합모드 I+II($\theta = 30^\circ, 60^\circ$)로 변화시켜 구분하였다. 과대하중비는 아래의 식 (1)과 같다.

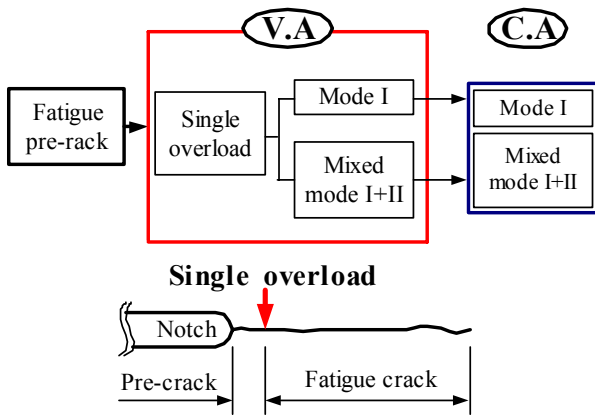


Fig. 2 The experimental procedure

$$ROL (\%) = \frac{P_{OL} - P_{max,BL}}{P_{max,BL}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, $P_{max,BL}$ 은 일정진폭 피로하중의 최대 하중이고, P_{OL} 은 단일과대하중의 최대 하중이다. 과대하중비, ROL(%)은 100%로 고정하였다.

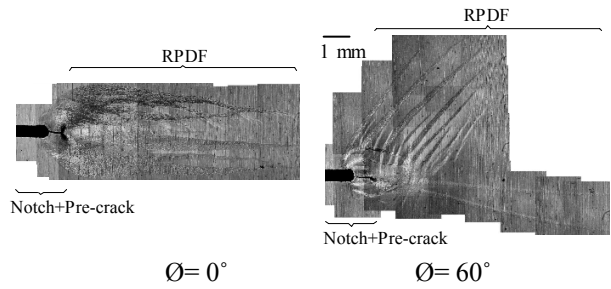
본 연구의 실험절차는 Fig. 2 에 도식적으로 나타내었다. 단일과대하중과 일정진폭 피로하중의 작용모드를 각각 변화시키는 조합으로 실험조건을 구성하였다. 본 실험의 조건은 (i)과대하중을 작용시키지 않은 경우+{모드 I, 혼합모드 I+II}의 피로하중 조건(Case A), (ii){모드 I, 혼합모드 I+II} 과대하중+모드 I 피로하중의 조건(Case B), (iii)모드 I 과대하중+{모드 I, 혼합모드 I+II} 피로하중으로 조합된 조건(Case C)으로 구분하였다.

단일과대하중은 Fig. 2 와 같이 이미 전과한 피로균열의 전과경로에 대한 영향을 줄이기 위하여 예비균열선단에 작용시켰으며, 작용주파수의 크기는 0.02 Hz 이다.

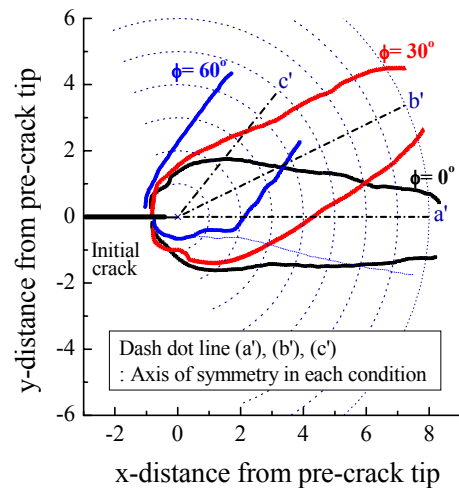
피로시험은 단일과대하중을 작용시킨 후 일정진폭의 하중 하에서 수행되었다. 피로하중은 최대크기($P_{max,BL}$)가 3.6 kN, 응력비는 0.5 이며, 10 Hz 의 Sine 파형을 갖는 인장-인장하중상태이다. 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로 시험기인 Instron 1331 이다.

단일과대하중의 작용으로 예비균열 전방에 형성된 표면의 잔류소성변형은 광학현미경을 이용하여 변형윤곽의 형상과 크기를 파악하였다. 피로균열의 전과길이와 위치는 예비균열선단에 설정한 기준좌표계를 중심으로 하여 균열이미지 캡처링 시스템으로 측정하였다. 피로균열의 전과속도는 7 점 증분 다항법으로 계산되었다.

수정 CTS 시험편의 응력확대계수 K_I 과 K_{II} 는



(a) The deformation areas obtained from a microscope



(b) Contours of RPDFs

Fig. 3 Contours of residual plastic deformation field

Richard 와 Benitz⁽⁸⁾가 제안한 식을 이용하여 계산하였으며, 이는 혼합모드 I+II 과대하중의 소성영역을 계산하는데 이용되었다.⁽⁹⁾

3. 실험결과

3.1 혼합모드 과대하중에 의한 변형양상

3.1.1 균열전방의 잔류소성변형장의 양상

단일과대하중의 작용으로 인하여 시험편의 표면에 형성된 예비균열전방의 잔류소성변형장(residual plastic deformation field, RPDF)의 형상은 Fig. 3 (a)와 같이 관찰된 변형영역의 사진으로부터 얻은 외형 윤곽선으로 나타내었다.

잔류소성변형장의 윤곽선은 과대하중의 작용모드 변화에 따라 형상과 크기에서 차이를 보이고 있다. 모드 I($\phi=0^\circ$) 과대하중의 경우, 잔류소성변형장은 기준좌표계의 x 축을 중심으로 대칭형상을 나타내었다. 혼합모드 I+II ($\phi=30^\circ, 60^\circ$) 과대하중의 경우, 변형장은 x 축으로부터 회전한 축(b', c')을 중심으로 대칭 형성되었으며, 모드 II 하중 성분이

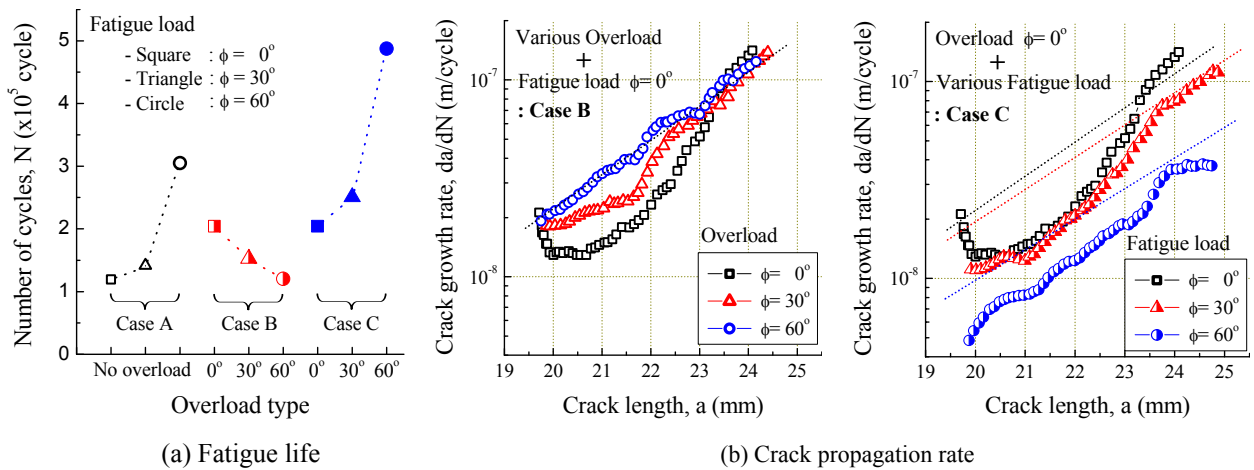


Fig. 4 The variation of fatigue behavior caused by various overload mode

증가할수록 잔류소성변형장의 윤곽선 크기와 두께 방향으로의 변형량은 감소하였다.

상이한 방향으로 형성된 잔류소성변형장의 형상과 크기는 이후 피로하중의 작용모드와의 상관관계에 의하여 균열의 전파거동에 상호작용의 영향을 미치게 된다.

3.1.2 혼합모드 소성역의 산출

모드 I 및 혼합모드 I+II 과대하중 하에서 형성되는 소성역의 크기와 형상은 Von-Mises 항복조건을 이용하여 평가되었다. 평면응력조건에 대한 소성역의 크기와 형상은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 $r_p(\theta)$ 는 균열평면계에 대한 각도별 소성역의 반경이며, K_I 과 K_{II} 는 작용모드의 변화에 따른 인장과 전단의 응력확대계수이다. 하중작용각도 θ 가 증가함에 따라 혼합모드 소성역은 비대칭의 형상을 이루고, 모드 I 의 크기와 비교해서 상대적으로 감소하였으며, 균열면에 대하여 회전하여 형성된다. 혼합모드 소성역의 형상과 크기는 이후 피로하중의 작용모드와 관련하여 균열의 지연성장애 차이를 제공한다.

3.2 혼합모드 과대하중에 의한 균열전파거동

본 절에서는 단일과대 및 일정진폭 하중상태의 작용모드를 각각 변화시킨 실험을 통하여 피로균

열의 전파거동을 고찰하였다. 실험조건별 피로수명과 피로균열 전파속도의 변화는 Fig. 4 에 나타내었다.

Case B 의 경우, 혼합모드 단일과대하중의 작용으로 모드 I 피로하중 하에서의 피로거동은 모드 I 과대하중의 경우와 상이한 결과를 가져왔다. 과대하중과 피로하중의 작용모드가 동일한 모드 I 의 경우 피로수명은 과대하중의 상호작용효과에 의한 최대지연으로 증가하였다. 하지만 $\theta=60^\circ$ 과대하중의 경우, 과대하중의 긍정적 균열성장 지연의 영향은 거의 나타나지 않았다. 이는 전단과대하중성분으로 인한 비대칭 소성역의 형성으로 압축잔류응력의 작용력이 감소하고, 균열전단의 둔화가 거의 나타나지 않았으며, 모드 I 피로하중의 균열진전력이 충분히 크게 작용하여 지연효과가 거의 나타나지 않았기 때문이다.

Case C 의 경우는 과대하중의 작용모드를 모드 I 으로 고정하고 모드 I 과 혼합모드 I+II 의 피로하중을 작용시키는 실험조건 사이의 결과를 비교하였다. Case A 의 경우와 마찬가지로 동일한 작용모드의 과대하중에 의한 균열지연효과는 피로하중의 각 모드에 일정하게 반영되어 나타났다. 피로하중의 전단성분이 증가함에 따라 모드 I 에 비해서 감소한 균열진전력이 과대하중 변형장 내에서 그에 의한 영향을 크게 받기 때문이다.

이상과 같은 실험결과는 단일과대하중과 피로하중의 작용모드가 어떠한 조합을 이루는가에 따라서 피로수명에 차이를 보일 수 있음을 확인시켜준다. 작용하는 과대하중의 전단성분이 증가할수록 균열전단은 예리해지고⁽¹⁰⁾ 이후 모드 I 과 같이 균열진전력이 큰 피로하중을 받을 경우 피로수명은 과대하중에 의한 지연성장이라는 우호적인 영향을 거의 받을 수 없음을 고려해야 한다고 생각된다.

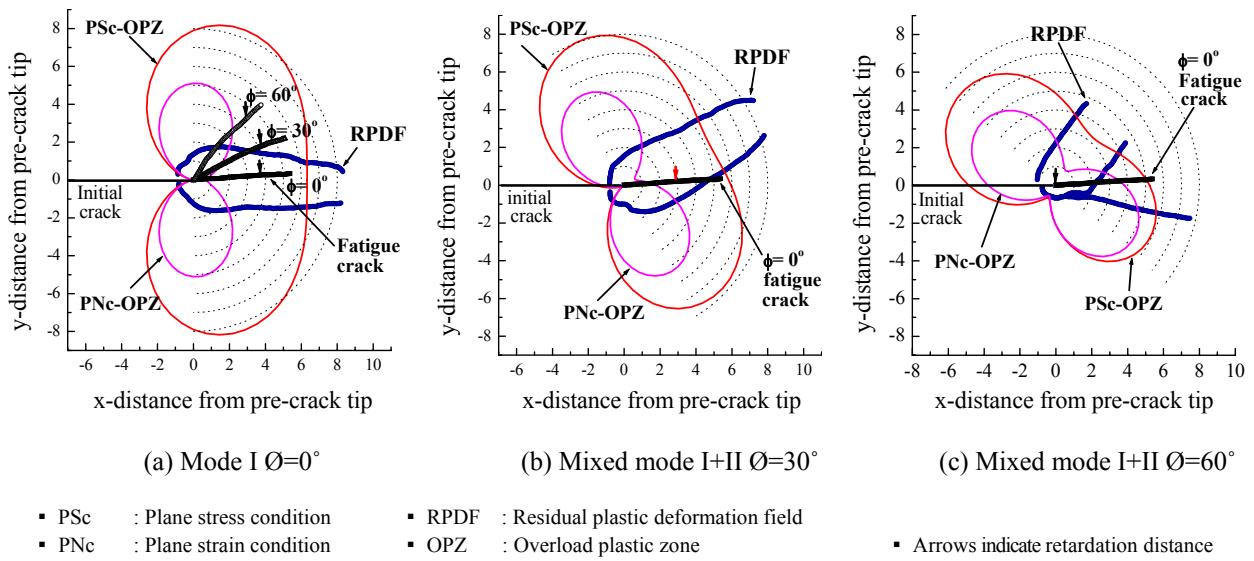


Fig. 5 The RPDF, plastic zones induced by the mode change of single overload and crack propagation paths

3.3 소성변형장과 균열전파거동의 비교

본 절에서는 변형장과 피로균열의 전파거동에서 관찰된 요소들을 비교함으로써 단일과대하중의 작용모드 변화에 따른 관계와 영향에 대하여 고찰하고자 하였다.

단일과대하중의 각 모드 별로 잔류소성변형장과 산출된 소성역(평균응력, 변형률 조건의 경우)을 중첩시키고, 여기에 각 작용모드에서의 피로균열의 전파경로와 함께 지연구간을 표시하여 Fig. 5와 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 및 혼합모드 I+II 피로균열의 전파경로 상에 존재하는 소성역과 잔류소성변형장의 형태는 단일과대하중과 일정진폭 피로하중의 작용모드 별로 다르게 위치하였다.

Case B(Fig. 5 (b), (c))의 경우, 피로균열의 전파경로방향으로 위치하는 소성역의 범위는 과대하중의 전단성분 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. 혼합모드 단일과대하중으로 인해 형성된 잔류소성변형장에 작용하는 잔류응력의 영향은 그것의 작용방향과 전파하는 피로균열의 전파방향이 수직하지 않는 경우 피로균열 전파에 대한 지연효과를 기대하기 어렵다는

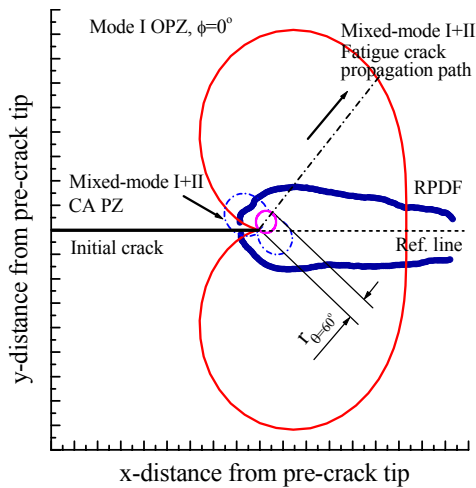
것을 확인할 수 있었다.

실제 피로균열의 지연거동에 영향을 미치는 영역의 특성은 과대하중으로 형성된 소성변형장의 형상과 피로하중의 작용모드에 의한 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

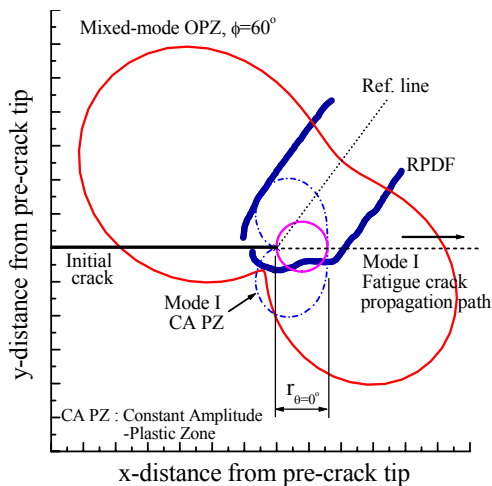
피로수명의 예측과 평가에 대한 정확도를 향상시키기 위해서 과대하중의 작용모드 변화에 의한 균열선단의 변형양상, 피로균열의 전파경로에 형성된 소성변형장의 형상과 피로하중의 작용모드가 종합적으로 검토되어야 한다.

3.4 혼합모드 하중상호작용 모델의 기초검토

변동하중 하에서 피로수명의 예측에 대한 연구는 균열선단의 복합적인 양상을 실험적, 해석적으로 고려한 모델들을 제안해 왔다. 이 중에서 균열전파속도가 균열선단의 소성영역과 관련하고 있음을 기초로 하여 개발된 균열선단 소성모델(crack-tip plasticity model)은 많은 적용과 개선작업이 이루어져 왔다. 이러한 예측모델은 변동하중과 피로하중의 작용모드가 동일한 경우에 대하여 주로 전개되어왔으며, 본 실험에서와 같이 작용하중의 모드가 변하는 경우에 대해서는 드물다고 할 수 있다. 이 경우에 피로수명의 예측은 피로균열의 전파방향, 혼합모드 변동하중에 의한 소성역의 크기 및 형상의 대칭성, 그 작용점에서의 균열선단의 형상변화 사이의 상호관계를 고려하는 모델의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 개념정립을 위한 기초작업의 일환으로 관련인자들을 도식적으로 Fig. 6과 같이 종합하였다.



(a) Mode I overload + Mixed-mode fatigue load



(b) Mixed-mode overload + Mode I fatigue load

Fig. 6 Mixed-mode overload interaction model

4. 결론

본 연구에서는 단일과대하중 및 일정진폭 피로하중의 작용모드 변화가 하중상호작용에 미치는 영향에 대해서 변형장과 피로거동 사이의 관계를 검토함으로써 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 작용모드의 변화로 인한 작용하중의 성분변화는 균열전방의 잔류소성변형장의 형성과 피로균열의 전파거동에 영향을 미치게 된다. 과대하중의 작용모드 변화에 따른 과대하중 소성역의 변화는 압축잔류응력의 작용방향과 크기 및 피로균열의 전파거동에 상이한 영향을 미칠 것임을 암시한다.

(2) 단일과대하중과 피로하중의 작용모드가 어떠한 조합을 이루는가에 따라서 피로수명에 상당

한 차이가 나는 것을 확인하였다. 작용하는 과대하중의 전단성분이 증가할수록 피로균열의 전파거동에 미치는 과대하중의 지연효과는 감소한다.

(3) 피로균열의 지연거동에 영향을 미치는 영역의 특성은 과대하중으로 형성된 소성변형장의 형상과 피로하중의 작용모드에 의한 영향을 크게 받는다.

(4) 혼합모드 변동하중 하에서의 피로수명 예측에 대한 모델이 필요하며, 개념정립을 위한 관련인자들을 종합적으로 정리하는 기초안을 구성하였다.

참고문헌

- (1) Skorupa, M., 1998, "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.
- (2) Qian, J. and Fatemi, A., 1996, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969 ~ 990.
- (3) Gao, H. and Fernando, U. S., 1996, "Effect of Non-Proportional Overloading on Fatigue Life," *Fatigue Fracture Engineering Materials Structures*, Vol. 19, No. 10, pp. 1197 ~ 1206.
- (4) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure in Damage Tolerance in Aircraft Structure," *ASTM STP. 924*, pp. 230 ~ 242.
- (5) Song, S. H. and Kwon, Y. K., 1997, "A Study on Fatigue Crack Retardation and Retardation Mechanism in Variable Loading," *Transaction of the KSPE*, Vol. 14, pp. 76 ~ 81.
- (6) Jones, R. E., 1973, "Fatigue Crack Growth Retardation After Single-Cycle Peak Overload in Ti-6Al-4V Titanium Alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 5, pp. 585 ~ 604.
- (7) Richard, H. A. and Benitz, K., 1983, "A Loading Device for the Criterion of Mixed Mode in Fracture Mechanics," *International Journal of Fracture*, Vol. 22, pp. R55 ~ R58.
- (8) Richard, H. A., 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337 ~ 3344.
- (9) Pook, L. P., 1971, "The Effect of Crack Angle on Fracture Toughness," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 3, pp. 205 ~ 218.
- (10) Song, S. H. and Lee, J. M., 2004, "Effects by Applying Mode of Single Overload on Propagation Behavior of Fatigue Crack," *Transaction of the KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp. 109 ~ 116.