

# 혼합모드 단일과대하중 하의 피로균열 전파거동에 관한 실험적 연구

송삼홍<sup>†</sup> · 이정무\* · 홍석표\*

## An Experimental Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior Under Mixed-Mode Single Overload

Sam-Hong Song, Jeong-Moo Lee and Suck-Pyo Hong

**Key Words :** Single Overload(단일과대하중), Mixed-mode loading(혼합모드 하중), Retardation(지연), Overload Ratio(과대하중비), Compact Tension Shear specimen(CTS 시험편), Fatigue life(피로수명)

### Abstract

In this study, retardation behavior of fatigue crack under single overloading of the mixed mode I+II state was experimentally investigated. To produce single overload in the mixed mode I+II state, the compact tension shear (CTS) specimen and loading device were used. The propagation tests for fatigue crack were performed under mode I loading overloading afterwards. We examined the observed deformation aspects, variation of fatigue life and crack propagation rate, and the aspects of retardation behavior from tests. The retardation effect of mixed-mode single overload on fatigue crack propagation behavior was smaller than that of mode I single overload. It has been confirmed that the retardation behavior did not immediately appear and the retardation length was short when the component of mixed-mode overload was changed.

### 1. 서 론

사용중인 기계구조물이 받는 하중은 다양한 조건에 의하여 여러 하중상태가 결합된 상태이며, 또한 지속적으로 변동하므로 변동하중 하에서의 피로수명에 대한 연구는 중요하게 다루어져 왔다. 그리고 복잡한 하중상태의 결합, 비등방성 비균질성 복합재료의 적용확대 및 복잡한 기하학적 형상을 요구하는 설계조건으로 인하여, 기계요소나 구조물에는 실제 혼합모드 하중이 작용하는 경우가 증가하고 있어 이에 대한 연구도 폭넓게 이루어지고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup> 실제 운전중인 요소에는 이와 같이 변동하중과 혼합모드 하중이 모두 작용하기

때문에 진폭의 변동이 있는 하중이력의 영향뿐만 아니라, 작용하중의 상태변화가 피로수명에 미치는 영향에 대해서도 검토가 필요하다고 생각된다. 여기서 진폭의 변동은 과대, 과소의 변동하중이며, 하중상태의 변화는 작용응력의 인장 및 전단성분의 변화를 의미한다.

과대하중 하의 피로균열 전파거동에 대한 대부분의 연구는 실험조건 및 균열의 형태에 따라 여러 가지 결과를 보이기도 하지만 과대하중이 작용한 후 균열의 성장은 지연된다는 결과를 보고하고 있다. 이 중 송과 이<sup>(2)</sup>는 단일과대하중이 작용한 직후 균열의 전파속도는 일정진폭하에서의 그것과 비교하여 급격한 가속 및 감속을 거친 후 비교적 긴 구간에서 완만한 지연현상이 나타나며, 이는 짧은 균열과 긴 균열에 대해 공통적으로 나타난다고 하였다. 피로균열의 지연현상에 영향을 미치는 인자는 과대하중비<sup>(3)</sup>, 과대하중시기<sup>(4)</sup>, 응력비<sup>(5)</sup> 및 시험편 두께<sup>(4)</sup> 등이 알려져 있다. 피로균열의 지연현상은 위와 같은 여러 인자들의 영향이 복잡하게

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@korea.ac.kr

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

\* 회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

**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

관계하고 있어 그에 대한 설명 및 평가에는 어려움이 따른다. 송과 권<sup>(6)</sup>은 지연구간에서 발생하는 균열가지가 균열선단의 균열진전력을 감소시키므로 지연현상의 평가시 균열가지 효과를 고려해야 한다고 보고하였다. 이와 같이 피로균열성장의 지연기구를 설명하는 연구결과로는 균열선단 둔화<sup>(7)</sup>, 균열선단의 압축잔류응력<sup>(8)</sup>, 소성유기 균열단힘<sup>(9)</sup>, 균열선단 가지현상<sup>(10)</sup> 등이 알려져 있다.

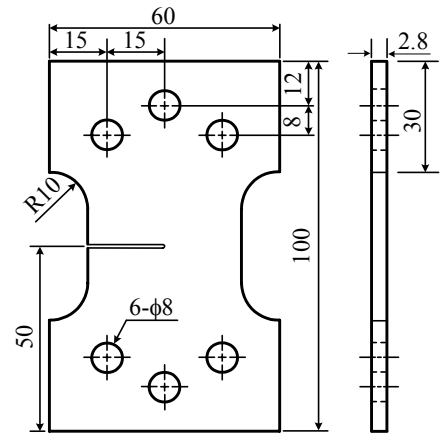
지연현상과 지연기구를 설명하기 위하여 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 혼합모드 I+II 와 같은 과대하중의 작용모드를 변화시켜 피로균열의 거동을 고찰한 연구결과는 찾기가 힘들다. 혼합모드 하중 하의 피로균열의 거동에 대한 관심과 연구가 증가하는 것처럼 보다 실제적인 작용하중의 상황에 대한 연구자료가 필요하다고 생각된다. 그러므로 본 연구에서는 과대하중의 작용모드를 변화시킴으로써 나타나는 피로균열의 전파거동에 대하여 고찰하고자 한다.

본 연구에서는 단일과대하중의 작용 하의 피로 거동에 대한 연구의 연장선으로 혼합모드 단일과대하중이 작용할 때 나타나는 피로균열의 전파거동에 대하여 고찰하였다. 혼합모드 단일과대하중 하의 피로거동에 관한 구체적인 고찰내용은 다음과 같다. 혼합모드 I+II 의 단일과대하중의 작용에 의한 균열선단의 변형형상과 양상에 대하여 고찰하였다. 피로균열의 전파거동에서 나타나는 혼합모드 단일과대하중에 의한 영향을 일정진폭 및 모드 I 하중에서의 거동과 비교하여 지연현상의 차이를 고찰하였다.

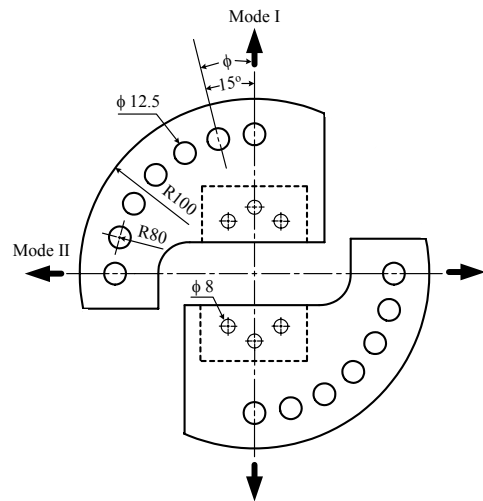
## 2. 실험

### 2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 KS D 3519 에 규정된 자



**Fig. 1** Configuration of modified CTS specimen



**Fig. 2** Configuration of loading device

동차 구조용 열간 압연강판(SAPH440)이다. 이 재료는 주로 차체 하부구조의 강도를 유지하는 자동차의 프레임 및 차체와 차륜의 상하방향 지지와 강성을 유지하는 현가장치의 상, 하 암에 사용되며, 여러 멤버류의 제작 및 결합에 적합하도록 프레스 가공성과 용접성이 우수하다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2 와 같다.

### 2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 혼합모드 I+II 의 과대하중을 작용시키기 위하여 단순인장전단(Compact Tension Shear: CTS) 시험편과 하중장치를 수정하여 사용하였다. 이에 대한 형상과 치수는 Fig. 1, 2 와 같다.

수정 CTS 시험편은 큰 비율의 전단하중을 필요로 하는 실험에서 하중전달의 정확성과 실험의 안정성을 확보하기 위하여 하중장치와의 결합부위 및 노치가 가공되는 평형부위가 수정된 것이다.

균열선단에 작용하는 다양한 하중상태의 조성에는 하중장치를 이용하였으며, 균열선단에 대한

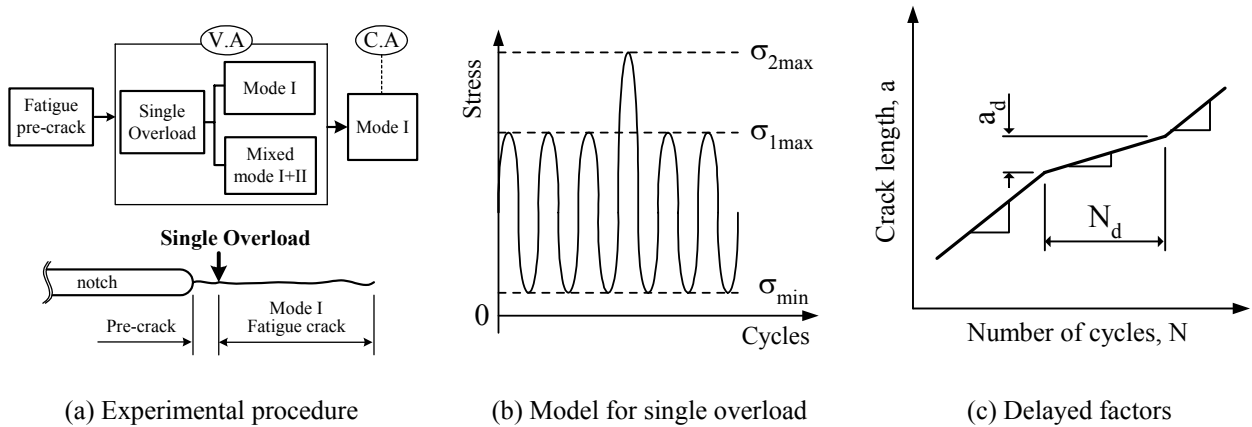


Fig. 3 Schematic representation of experimental procedure

여 작용하중의 방향을 변화시킴으로써 인장하중과 전단하중의 작용비율을 조절하였다. 사용된 하중 장치는 Richard 와 Benitz<sup>(11)</sup>의 모델을 기본으로 하여 제작되었다. 하중작용각도(Loading application angle:  $\phi$ )가  $0^\circ$  인 경우는 인장하중이 작용하는 모드 I 의 상태를,  $90^\circ$  인 경우는 전단하중이 작용하는 모드 II 의 하중상태를 나타낸다. 이 두 하중작용각도 사이의 경우는 인장하중과 전단하중이 결합하여 작용하는 혼합모드 I+II 의 하중상태를 나타낸다.

2.3 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로시험기인 Instron 1331 이다. 피로하중의 형태는 일정진폭의 인장-인장하중상태이고, 응력비는 0.5 이며, 주파수의 크기와 파형은 10Hz 와 Sine 파형이다.

변동하중의 모델로는 단일과대하중 모델을 사용하였다. 단일과대하중의 크기는 식 (1)의 과대하중비(Overload ratio %,  $R_{OL}$ )를 사용하여 정의하였다.

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

여기서,  $\sigma_{1max}$  는 일정진폭 하중시의 최대응력확대 계수이고,  $\sigma_{2max}$  는 단일과대하중시의 값이다.

본 연구에서 일정진폭 하중에 대한 실험의 최대응력은 45MPa 이고, 과대하중비는 100%로 고정하여 과대하중의 하중모드를 변화시켰다. 과대하중의 하중모드는 두 가지로 구분하였으며, 하나는 모드 I 인 인장과대하중이고 다른 하나는 혼합모드 I+II( $\phi=60^\circ$ )의 인장과 전단하중이 결합된 혼합모드 과대하중이다. 단일과대하중의 작용위치는

19.5mm 의 예비균열선단이다. 또한 과대하중의 작용 주파수 크기는 0.02Hz 이다.

피로시험은 예비균열선단에 대하여 단일과대하중을 작용시킨 후 모드 I 의 일정진폭 하중 하에서 진행되었다. Fig. 3 의 (a)는 실험의 순서를 나타낸 것이고, (b)와 (c)는 단일과대하중에 대한 모식도와 지연현상을 설명하기 위한 지연된 균열길이  $a_d$  와 지연된 하중반복수  $N_d$  를 정의한 것이다.

피로균열의 측정에는 예비균열선단을 기준으로 하는 좌표계를 설정하여 균열이미지 캡처링 시스템을 사용하여 측정하였다. 피로균열의 전파속도 계산에는 7 점 증분 다항법<sup>(12)</sup>(Seven Point Increment Polynomial Method)를 사용하였다.

수정 CTS 시험편의 응력확대계수  $K_I$  과  $K_{II}$  는 Richard<sup>(13)</sup>가 제안한 식(2)를 이용하여 계산하였다.

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

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

여기서 a 는 피로균열의 길이이며,  $\phi$  는 하중작용각도를 나타낸다.

균열전파속도의 평가를 위하여 혼합모드 과대하중의 경우  $K_I$  과  $K_{II}$  를 조합한 유효응력확대계수 ( $K_{eff}$ )가 도입되었으며, Tanaka<sup>(14)</sup>가 제안한 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

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

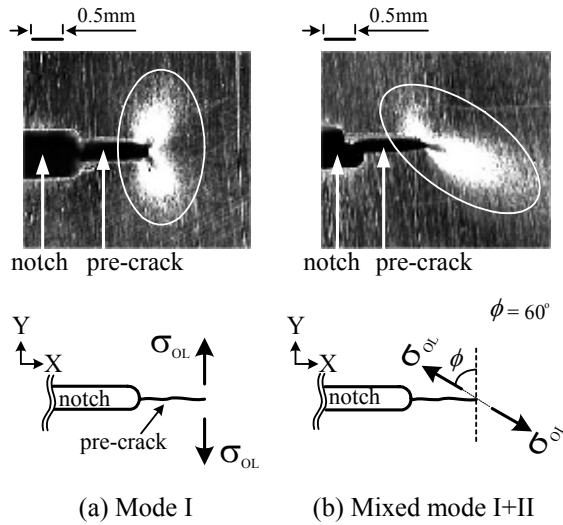


Fig. 4 Aspect of deformation shape of crack tip under single overload with loading mode

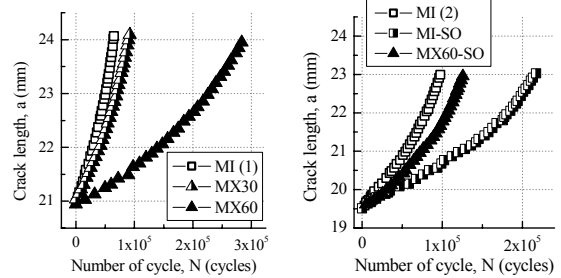
### 3. 실험결과

#### 3.1 과대하중에 의한 균열선단의 변형양상

본 절에서는 단일과대하중의 작용으로 나타나는 균열선단의 변형양상에 대하여 검토하였다.

Fig. 4 는 균열선단에 단일과대하중을 작용시켰을 때 나타나는 변형양상의 사진이다. (a)는 모드 I의 단일과대하중을 작용시켰을 때, (b)는 혼합모드 I+II( $\phi=60^\circ$ )의 단일과대하중을 작용시켰을 때의 결과이다. 두께 6mm의 시험편을 대상으로 45MPa의 하중 하에서 전파시킨 모드 I 피로균열선단에 과대하중비 100%의 과대하중을 작용시킨 예비시험의 결과이다. 과대하중의 하중모드 변화에 의해 나타나는 균열선단의 변형양상을 비교하기 위한 것으로 균열선단에는 심각한 변형이 발생하였다. 본 실험에서 고찰한 2.8mm의 시험편에서는 Fig. 4와 같이 큰 변형이 발생하지 않도록 조절하여 실험을 수행하였다. (a)의 모드 I 과대하중(이하 MI-SO)의 경우, 과대하중으로 인하여 균열선단의 열림변위는 크게 변화하였다. 단일과대하중 작용 전 약  $2\mu\text{m}$  이내의 변위가 작용 후에는 약  $470\mu\text{m}$ 로 변화하였다. 또한 과대하중으로 인한 소성변형의 양상은 균열선상을 중심으로 대칭형상으로 나타났으며, 변형된 균열선단에서 두께방향으로의 심한 변형을 관찰할 수 있었다. (b)의 혼합모드 단일과대하중(이하 MX60-SO)의 경우도 과대하중 작용 후 균열의 열림변위는 약  $340\mu\text{m}$ 로 변화하였다. 작용시킨 혼합모드 과대하중모드에 의하여 MI-SO의 경우보다 그 변위량은 상대적으로 작게 나타났

MI : Mode I (Constant Amplitude)  
 MX30, MX60 : Mixed mode  $\phi=30^\circ$ ,  $\phi=60^\circ$   
 MI-SO : Mode I Single Overload  
 MX60-SO : Mixed mode ( $\phi=60^\circ$ ) Single Overload



(a) Constant Amplitude fatigue test (b) Variable Amplitude fatigue test

Fig. 5 Relationship between a and N

으며, 균열전방의 변형형상은 균열선단을 중심으로 비대칭의 형상을 나타내었다. Fig. 4 (b)에서 보는 것과 같이 균열선단에 형성된 비대칭 형상의 변형영역은 모드 I 과대하중에 의해 발생한 변형형상과 뚜렷한 차이를 보이며, 이로 인하여 과대하중 후의 일정진폭 피로하중 하에서 전파하는 균열의 거동에도 차이가 있음을 예상할 수 있다. 혼합모드 과대하중에 의해 나타나는 피로균열의 전파거동을 고찰하기 위하여 균열선단에 형성된 변형의 형상 및 변형 정도와 과대하중 작용 후의 균열거동과의 관계를 고려하기 위한 여러 실험적 관찰과 평가가 현재 진행 중에 있다. 또한 유한요소 해석을 통하여 혼합모드 과대하중에 의해 형성되는 소성역의 평가와 이를 피로균열의 거동과 연관시켜 고찰하는 연구가 추후 첨부될 것이다.

#### 3.2 과대하중 하의 피로균열의 전파거동

본 절에서는 하중모드 변화에 따른 단일과대하중 하의 피로균열의 전파거동을 고찰하였다. 이를 위하여 두께 2mm의 정규화된 균열길이비(a/W)가 0.525인 시험편에 대하여 일정진폭의 하중상태( $\sigma_{\text{max}}=45\text{MPa}$ )의 경우, 모드 I 과 혼합모드 하중 하에서 나타나는 피로거동의 양상을 단일과대하중 이후의 피로거동과 비교하였다.

Fig. 5는 균열길이 a와 하중반복수 N의 관계를 나타낸 것이다. (a)는 일정진폭의 모드 I 및 혼합모드 하중( $\phi=30^\circ, 60^\circ$ ) 하의 a와 N 관계를, (b)는 모드 I 및 혼합모드( $\phi=60^\circ$ ) 단일과대하중하의 a와 N 관계를 나타낸 것이다. (b)의 경우 과대하중 작용 이후에 나타나는 것으로 보고되는 지연현상과

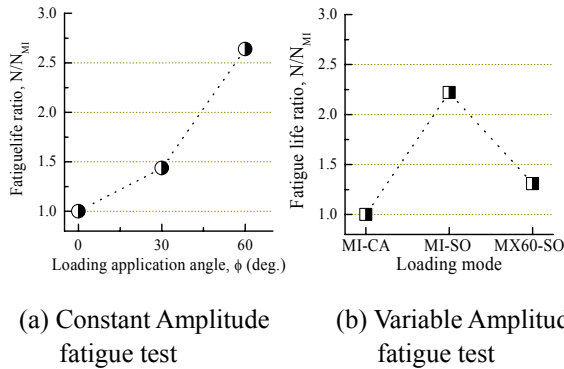


Fig. 6 Relationship between a and N

관련하여 지연구간이 뚜렷하게 나타나지는 않지만 과대하중으로 인하여 나타난 수명의 변화에는 분명한 차이를 보이고 있다.

Fig. 6 에는 하중모드의 변화에 따른 피로수명의 변화를 비교하여 나타내었다. (a)는 일정진폭 하중에 대해서, (b)는 과대하중 작용 후의 피로거동에 대한 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. (a)의 경우는 예비균열선단으로부터 균열이 3mm 전파할 때까지의 피로수명을 비교한 것으로, 모드 I 하중하의 피로수명에 비하여 혼합모드비가 증가할수록 피로수명은 크게 증가하였다.  $\phi=60^\circ$  의 경우 피로수명은 모드 I 의 수명에 비하여 약 2.6 배나 증가하였다. (b)의 경우는 단일과대하중의 작용 이후 모드 I 하중 하에서의 피로수명의 변화를 비교한 것으로 과대하중의 모드에 의한 영향의 차이를 파악할 수 있다. 과대하중 작용 후 피로균열이 약 3.4mm 까지 전파할 때의 수명은 일정진폭 하의 모드 I(이하 MI)의 수명보다 약 2.2 배 증가하였다. 또한 MX60-SO 경우의 수명은 MI 의 수명보다 약 1.3 배 증가한 것으로 나타났다. MI-SO 경우의 수명이 MX60-SO 경우의 수명보다 약 70% 증가된 결과를 보이고 있다. 과대하중에 의한 지연영향은 혼합모드 단일과대하중보다 모드 I 단일과대하중에서 더 두드러지게 나타났다. 이러한 결과는 균열선단에 형성되는 변형 및 소성영역의 형상에 기인하는 것으로 판단된다. MX60-SO 의 경우 균열선단에는 비대칭의 변형형상을 형성하며, 과대하중 이후 일정진폭의 모드 I 하중 하의 피로균열이 변형된 영역을 관통하는 시간이 MI-SO 의 경우보다 상대적으로 오래 유지되기 때문으로 생각된다. 이에 대한 연구는 추후 변형과 소성영역에 대한 평가를 통하여 고찰할 것이다.

Fig. 7 은 균열전파에 따른 전파속도의 관계를 나타낸 것이다. (a)는 일정진폭 하중 하의 피로균열의 전파거동을, (b)는 일정 및 단일과대하중 작

MI : Mode I (Constant Amplitude)  
 MX30, MX60 : Mixed mode  $\phi=30^\circ, \phi=60^\circ$   
 MI-SO : Mode I Single Overload  
 MX60-SO : Mixed mode ( $\phi=60^\circ$ ) Single Overload

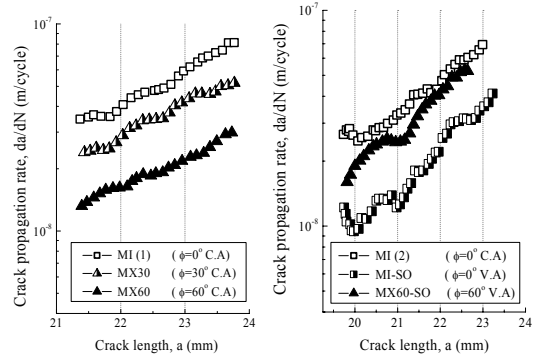


Fig. 7 Relationship between a and da/dN

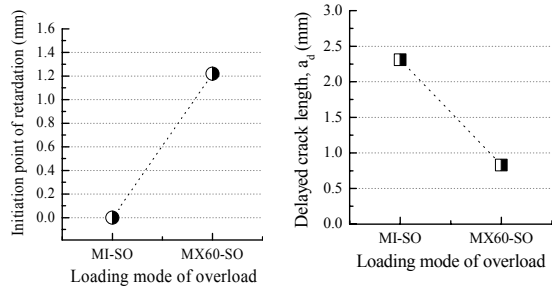


Fig. 8 The delayed factors with variation of loading mode for overload

용으로 나타나는 피로균열의 전파거동을 나타낸 것이다. (a)의 경우 동일한 균열길이에 대하여 혼합모드비, 즉, 전단하중의 성분이 증가할수록 균열 전파속도는 감소하였다. 또한 균열이 증가함에 따라 각 모드 별로 일정한 균열전파속도의 차이를 지속적으로 유지함을 알 수 있었다. 이에 반하여 (b)의 경우는 과대 하중의 작용에 의한 전파속도의 변화가 나타나고 있다. 주목할 점은 피로수명의 비교에서 확인하였듯이 혼합모드 과대하중이 작용한 후 일정진폭모드 I 하중 하의 피로균열의 전파속도가 모드 I 과대하중 후의 속도보다 빠르게 나타나고 있다. 이는 특히 균열이 전파하는 초기 영역에서 균열전파속도의 저하는 없었으며, 예비균열선단으로부터 약 1mm 정도 전파 후부터 균열의 전파속도는 약간 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8 은 Fig. 7 의 전파속도에서 나타난 과대하중의 영향을 지연관련 인자를 이용하여 정리한 것이다. (a)는 지연거동이 나타나기 시작하는 위치를 균열길이로 표시한 것으로 MI-SO 의 경우 지연은 과대하중 작용 직후 나타났으며, MX60-SO 의 경우에는 과대하중 작용지점으로부터 피로균열이 약 1.2mm 전파한 위치에서 지연거동이 관찰되었다. (b)는 과대하중에 의해 지연된 균열의 길이를 비교한 것으로 지연균열길이는 MI-SO 의 경우는 약 2.3mm, MX60-SO 의 경우는 약 0.8mm 로 나타났다. MI-SO 의 경우가 MX60-SO 의 경우보다 약 2.8 배 크게 나타났다. 또한 지연반복수의 경우도 MI-SO 가 MX60-SO 보다 약 2.3 배 컸다. 모드 I 단일과대하중 작용 후, 피로균열의 전파속도에는 지연현상이 바로 나타나기 시작하며, 지연구간도 크게 나타났다. 혼합모드 단일과대하중의 경우 지연현상은 일정한 균열길이까지 전파한 후에 나타나기 시작했으며, 지연구간도 상대적으로 짧게 나타났다. 그러므로 혼합모드 단일과대하중이 작용할 경우 지연현상은 기존의 모드 I 과대하중의 연구결과와 차이를 보이기 때문에 수명평가지 고려하여야 함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CTS 시험편을 이용하여 단일과대하중의 하중모드를 변화시켜 피로균열의 전파실험을 수행하였다. 혼합모드 단일과대하중 하의 피로균열의 전파거동에 대하여 실험적인 고찰을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단일과대하중의 하중모드에 따라 균열선단에서의 변형과 소성영역의 형상은 차이를 보였다. 모드 I 단일과대하중의 경우 균열선단에서의 변형양상과 소성역은 대칭적으로 발생한 반면,  $\theta=60^\circ$  의 혼합모드 단일과대하중의 경우 균열선단에 비대칭의 변형양상과 소성영역이 형성되었으며, 이는 과대하중 작용 후 피로균열의 전파거동과 관련하여 고찰이 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 혼합모드 단일과대하중의 작용 후 균열의 전파거동에는 지연현상이 관찰되었지만 모드 I 단일과대하중의 경우와는 차이를 나타내었다. 이 때의 지연거동은 바로 나타나지 않았으며, 균열이 약 1mm 전파한 지점에서 나타났다. 또한 지연구간도 모드 I 의 경우와 비교하여 작게 관찰되었다. 혼합모드 단일 과대하중의 작용으로 인한 지연거동은 기존의 모드 I 과대하중의 경우와 차이를 보이므로 수명예측시 이에 대한 고려가 필요하다.

#### 참고문헌

- (1) J. Qian and A. Fatemi, 1996, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969~990.
- (2) Sam-Hong Song and Kyeong-Ro Lee, 1998, "A Study on the Growth Behavior of Short and Long Crack and the Effect of Single Overload," *Transaction of the KSME*, Vol. 22, No. 6, pp. 990~1001.
- (3) Wei, R. P. and Shih, T. T., 1974, "Delay in Fatigue Crack Growth," *International Journal of Fracture*, Vol. 10, pp. 77~85.
- (4) Mills, W. J. and Hertzberg, R. W., 1975, "The Effect of Sheet Thickness on Fatigue Crack Retardation in 2024-T3 Aluminum Alloys," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 705 ~711.
- (5) Stephens, R. I., Chen, D. K., and Hom B. W., 1976, "Fatigue Crack Growth with Negative Stress Ratio Following Single Overloads in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys," *ASTM STP592*, pp. 27~40.
- (6) Sam-Hong Song and Yun-Ki Kwon, 1997, "A Study on Fatigue Crack Retardation and Retardation Mechanism in Variable Loading," *Transaction of the KSPE*, Vol. 14, No. 6, pp. 83~89.
- (7) Fleck, N. A. and Pickard, A. C., 1977, "Effects of Overloads on Fatigue Crack Propagation: Aluminum Alloys," *Met. Sci.*, Vol. 11, pp. 399~404.
- (8) 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.
- (9) Elber, W., 1970, "Fatigue Crack Closure Cyclic Tension," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 37~45.
- (10) Suresh, S., 1983, "Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Retardation Following Overloads," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, No. 3, pp. 577~593.
- (11) 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.
- (12) ASTM E647, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 565~601.
- (13) Richard H. A., 1986, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fracture," *Advances Fracture Research*, Vol. 5, pp. 3337~3344.
- (14) Keisuke Tanaka, 1974, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 493~507.