

## 단일과대하중의 작용모드 변화가 피로균열의 전파거동에 미치는 영향

송삼홍(고려대 기계공학과), 이정무\*(고려대 공학기술연구소)  
신승만·홍석표·서기정(고려대 대학원 기계공학과)

### Effects with the Variation of Single Overload mode on Propagation Behavior of Fatigue Crack

Sam Hong Song(Mechanical Eng. Dept., Korea Univ.),  
J. M. Lee(Research Institute of Engineering & Technology, Korea Univ.)  
S. M. Shin · S. P. Hong · K. J. Seo(Mecha. Eng. Dept. Graduate School Korea Univ.)

#### ABSTRACT

In this study, retardation behavior of fatigue crack under single overloading of the mixed mode 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 and mixed-mode loading afterwards. We examined the observed deformation aspects, the 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. Also the loading modes of variable and constant amplitude loads have influence on the retardation behavior of fatigue cracks.

**Key Words** : Single Overload (단일과대하중), Mixed-mode Loading (혼합모드 하중), Overload Ratio (과대하중비), Retardation (지연), Fatigue Life (피로수명)

#### 1. 서론

사용중인 기계구조물이 받는 하중은 다양한 조건에 의하여 여러 하중상태가 결합된 상태이며, 지속적으로 변동하므로 변동하중 하에서의 피로수명에 대한 연구가 중요하게 다루어져 왔다. 그리고 여러 하중상태의 결합, 복합재료의 적용확대 및 복잡한 기하학적 형상을 요구하는 설계조건으로 인하여, 기계요소나 구조물에는 실제 혼합모드 하중이 작용하는 경우가 증가하고 있으며 이에 대한 연구도 폭넓게 이루어지고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup> 실제운전 중인 요소는 이와 같이 변동하중 및 혼합모드 하중 상태에 놓이기 때문에 진폭의 변동이 있는 하중이력의 영향 뿐만 아니라, 작용하중의 상태변화가 피로수명에 미치는 영향에 대해서도 검토가 필요하다고 생각된다. 여기서 진폭의 변동은 단일 또는 블럭형태의 과대 및 과소하중으로 구성된 변동하중이

며, 작용하중의 상태변화는 작용하중의 인장 및 전단성분비율의 변화를 의미한다.

과대하중 하에서 피로균열의 전파거동에 관한 대부분의 연구는 과대하중이 작용한 후 균열의 성장이 지연된다는 결과를 보고하고 있다. 과대하중의 작용결과로 나타나는 이러한 지연현상에 영향을 미치는 인자로는 과대하중비<sup>(2)</sup>, 과대하중시기<sup>(3)</sup>, 응력비<sup>(4)</sup> 및 시험편의 두께<sup>(5)</sup> 등이 알려져 있으며, 이에 대한 설명 및 평가를 위하여 다양한 연구가 진행되어 왔다.<sup>(5-8)</sup> 하지만 대부분의 연구가 모드 I의 과대하중 상태하에서 이루어져 왔으며, 이의 작용모드를 변화시킨 혼합모드의 과대하중 상태하에서 피로균열의 거동을 고찰한 연구결과는 드물다. 또한 과대하중 작용 후 일정진폭 하중의 작용모드를 변화시키고, 이를 과대하중의 작용모드 변화와 조합하여 피로균열의 거동을 고찰한 연구는 찾기 힘들다. 그러므로 관심이 증대되고 있는 혼합모드 하

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

중 하의 피로거동에 관한 연구에 보다 실제적인 변동하중의 환경을 반영한 연구자료의 구축이 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 과대하중 및 일정진폭 하중의 작용모드를 변화시키는 것으로 구성된 각 실험조건 하에서 관찰된 피로균열의 전파거동을 비교하여 혼합모드 I+II 하중상태가 피로수명에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 혼합모드 I+II 상태인 단일 과대하중의 작용에 의하여 형성되는 균열전단의 변형양상에 대하여 비교하였다. 각 조건 하에서 관찰된 피로균열의 전파속도, 최소균열전파속도 및 균열 지연길이 등을 고찰하여 과대하중 및 일정진폭 하중에서 혼합모드 I+II 하중상태가 피로수명에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험재료

시험에 사용된 재료는 KS D 3519에 규정된 자동차 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, 프레스 가공성과 용접성이 우수하다. 시험재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

### 2.2 시험편과 하중장치

본 연구에서는 혼합모드 I+II의 하중을 작용시키기 위하여 수정 단순 인장전단(Modified Compact Tension Shear: CTS)시험편과 하중장치<sup>(9)</sup>를 사용하였다. 이에 대한 형상과 치수는 Fig. 1(a), (b)와 같다. 수정 CTS 시험편은 전단하중의 비율이 크게 작용하는 실험에서 하중전달의 정확성과 실험의 안정성을 확보하기 위하여 하중장치와의 결합부위 및 노치가 가공되는 평형부위가 수정된 것이다.

균열전단에 작용하는 다양한 하중상태의 조성에는 하중장치가 이용되었으며, 균열전단에 대하여 작용하중의 방향을 변화시킴으로써 인장하중과 전단하중의 작용비율을 조절하였다. 하중작용각도( $\theta$ )가  $0^\circ$ 인 경우는 모드 I,  $90^\circ$ 인 경우는 모드 II의 하중상태를 나타낸다. 이 두 하중작용각도 사이의 상태는 혼합모드 I+II의 하중상태를 나타낸다.

### 2.3 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 시험기는 전기 유압식 인장-압축피로 시험기인 Instron 1331이다. 단일과대하중을 작용시킨 이후, 피로하중의 형태는 일정진폭의 인장-인장하중상태이고, 응력비는 0.5이며, 주파수의 크기와 파형은 10Hz와 Sine 파형이다.

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

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

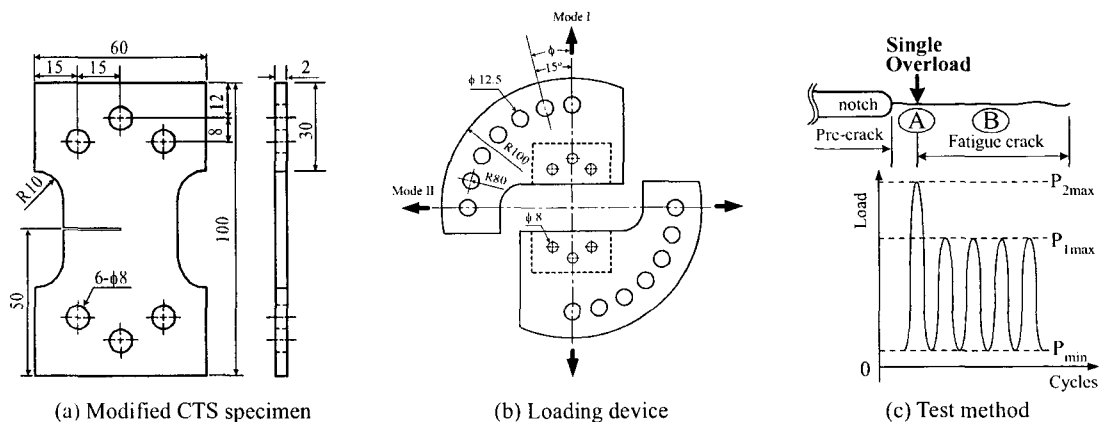


Fig. 1 Specimen, loading device and test method

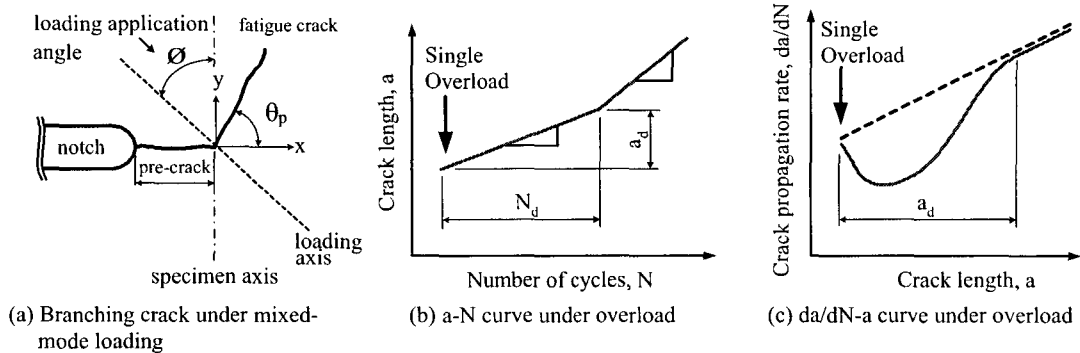


Fig. 2 The characteristics of fatigue crack behavior under mixed-mode I+II loading and single overload

여기서,  $P_{1max}$ 는 일정진폭 하중의 최대하중이고,  $P_{2max}$ 는 단일과대하중시의 최대값이다.

본 연구에서 일정진폭 하중 실험의 최대하중은 3.6kN이고, 과대하중비는 100%로 고정하였다. 과대하중의 작용모드는 모드 I과 혼합모드 I+II의 상태로 구분하였다. 단일과대하중의 작용위치는 Fig. 1 (c)에 나타낸 것처럼 예비균열선단( $a=19.5mm$ )에 작용시켰으며, 작용주파수의 크기는 0.02Hz이다. 피로 시험은 예비균열선단에 대하여 과대하중을 작용시킨 후 일정진폭 하중 하에서 피로균열의 전파거동을 관찰하였다. 실험조건은 단일과대하중과 일정진폭 하중의 작용모드를 변화시키는 방법으로 조건들을 조합하여 크게 세 가지로 구분하였다; (i) 과대하중을 작용시키지 않은 경우와 혼합모드의 일정진폭 하중의 조건(Case I), (ii) 혼합모드 과대하중과 모드 I 일정진폭 하중의 조건(Case II), (iii) 혼합모드 과대하중과 혼합모드 일정진폭 하중으로 조합된 조건(Case III)으로 구분하였다. 혼합모드 하중과 단일과대하중 하에서 관찰되는 피로균열의 전파거동에 대한 특징은 Fig. 2에 나타내었다.

피로균열의 측정에는 예비균열선단을 기준으로 하는 좌표계를 설정하여 균열이미지 캡처링 시스템을 사용하여 측정하였다. 피로균열의 전파속도는 7 점 증분 다항법을 사용하여 계산하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 단일과대하중에 의한 변형양상

본 절에서는 예비균열선단에 단일과대하중을 작용시켰을 때 과대하중의 작용모드에 따라 나타나는 균열선단의 변형양상을 검토하였다.

각각 작용시킨 단일과대하중의 작용모드에 따라 형성되는 예비균열선단의 변형양상은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다. 모드 I 과대하중의 경우, 균열선단의 변형형상은 대칭형상으로 변형영역이 크고, 두께방향으로의 변형이 뚜렷하게 나타났다.  $\theta=30^\circ$  과대하

중의 경우, 변형형상은 예비균열선상에 대하여 비대칭형상으로 나타났으며, 모드 I의 것과 비교하여 상대적으로 크기가 감소하였다.  $\theta=60^\circ$  과대하중의 경우, 변형형상의 비대칭 정도는 작용하중의 방향에 비례하여 형성되었으나 변형영역은 관찰평면과 두께방향으로 모두 미미하게 관찰되었다. 모드 II의 경우, 예비균열선단의 변화는 모드 I의 경우와 달리 외형적으로 뚜렷하게 나타나지는 않았으며, 미미하지만 다른 양상의 변형을 보였고, 예리한 균열선단을 유도하는 변형이 관찰되었다.

동일한 크기의 과대하중 작용에 의하여 나타나는 예비균열선단의 변형양상은 과대하중의 작용모드에 따라 변형의 범위와 양상에 상당한 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 이러한 변형양상은 과대하중의 전단성분이 변화함에 따라 나타나는 차이로 일정진폭의 하중모드에 따라 피로균열의 전파거동에 미치는 영향은 다양한 양상으로 나타날 것임을 유추할 수 있다. 이러한 변형양상과 균열의 전파거동과의 관계를 보다 명확하게 고찰하고자 변형영역에 대하여 여러 관찰방법을 이용한 평가가 현재 진행 중이다.

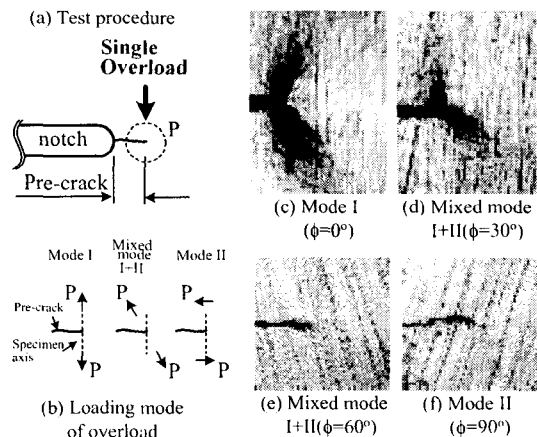


Fig. 3 Aspect of the deformation with overload mode

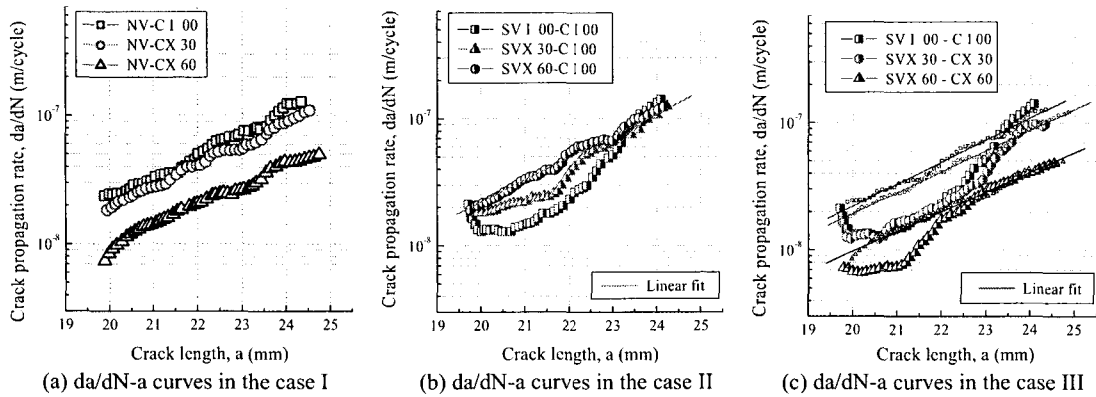


Fig. 4 Relationship between  $da/dN$  and  $a$  with the variation of loading mode

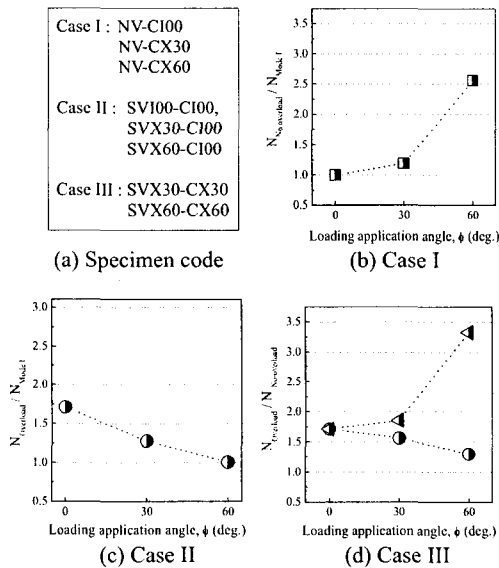


Fig. 5 The variation of fatigue life in each case

### 3.2 혼합모드의 단일과대하중 및 일정진폭 하중 하에서의 피로균열 전파거동

본 절에서는 혼합모드 I+II 상태의 단일과대하중 및 일정진폭 하중 하에서 나타나는 피로균열의 전파거동에 대하여 고찰하였다(Figs. 4, 5 참고).

#### 3.2.1 혼합모드 일정진폭 하중 하의 피로균열 전파거동

본 절에서는 과대하중을 작용시키지 않은 일정진폭의 모드 I 및 혼합모드 I+II 하중(Case I) 하에서의 피로균열의 전파거동에 관하여 고찰하였다.

모드 I과 혼합모드 I+II 하중( $\theta=30^\circ, 60^\circ$ ) 하의 피로균열의 전파속도는 일정한 차이를 가지고 있다(Fig. 4(a)). 전단하중성분의 증가에 따라 피로균열의

전파속도는 감소하였으며, 피로수명은 모드 I 하중 하의 피로수명에 비하여 약 2.5배의 증가를 보였다(Fig. 5(b)). 이는 전단하중성분의 증가에 따른 균열진전력의 저하로 인하여 나타나는 것이다. 또한 혼합모드 하중 하에서 피로균열은 예비균열선에 대하여 하중작용각도의 변화에 따라 편향하여 전파하였다.  $\theta=30^\circ$ 의 경우, 균열전파각도( $\theta_p$ )는  $22^\circ\sim 25^\circ$ 의 분포를 나타내었으며,  $\theta=60^\circ$ 의 경우,  $\theta_p$ 는  $51^\circ\sim 57^\circ$ 의 분포를 나타내었다. 동일한 크기의 하중이 작용할 때 균열선단에 작용하는 전단하중성분은 균열진전력의 감소를 유발하여 피로수명의 증가를 가져왔다.

#### 3.2.2 혼합모드 단일과대하중 하의 피로균열 전파거동

본 절에서는 단일과대 및 일정진폭의 하중상태에 대한 작용모드를 각각 변화시켰을 때 나타나는 피로균열의 전파거동에 관하여 고찰하였다. 실험은 혼합모드 단일과대하중과 모드 I 일정진폭 하중의 순서로 구성된 조건(Case II)과 혼합모드 단일과대하중과 동일한 성분의 혼합모드 일정진폭 하중의 순서로 구성된 조건(Case III)으로 구분되며, 각각의 실험조건에 따른 시험편의 구분은 Fig. 5(a)에 나타내었다.

Case II에서, 단일과대하중의 영향으로 인하여 피로균열의 전파속도에는 분명한 지연현상이 나타나고 있지만 과대하중의 작용모드와 모드 I 일정진폭 하중 사이의 관계에 따라 균열의 지연현상 등에는 차이를 나타내고 있다(Fig. 4(b), Fig. 5(c)).  $\theta=60^\circ$  과대하중의 경우, 과대하중의 영향으로 인한 지연거동은 거의 나타나지 않았다. 이는 전단하중성분에 의한 비대칭 변형형상으로 인하여 압축간류응력의 지연효과와 균열선단의 둔화 정도가 감소하였기 때문으로 판단된다. 또한 모드 I 일정진폭 하중의 큰 균열진전력으로 인하여 지연효과가 거의 나타나

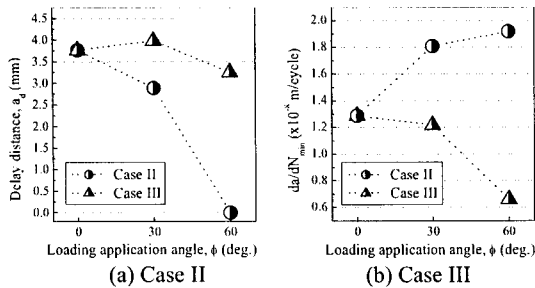


Fig. 6 Retardation factors;  $a_d$  and  $da/dN_{min}$

지 않은 것으로 생각된다.

Case III의 실험은 과대하중과 일정진폭의 하중 모드를 동일하게 설정한 조건으로 피로균열의 전파 거동은 Fig. 4(c)와 Fig. 5(d)에 나타난 것과 같다. 각 조건의 피로수명을 모드 I 일정진폭 하중 하의 수명과 비교한 결과, 모든 조건에서 피로수명이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5(d); 삼각형). 하지만 이를 동일한 일정진폭 하중모드의 피로수명과 비교하게 되면 피로수명의 증가율은 감소함을 확인할 수 있다(Fig. 5(d); 원형). 이 결과는 피로수명의 증가에 미치는 과대하중의 영향이 모드 I의 경우 가장 크며, 전단성분이 증가할수록 그 영향은 감소함을 보여준다. 전체 피로수명의 측면에서 비교하면 실제 피로수명의 증가는 과대하중과 혼합모드 하중의 영향이 결합되어 나타나고 있으며, 특히 일정진폭의 하중상태에 따른 균열전진력이 피로수명의 증가에 미치는 영향은 상대적으로 더 크게 나타나고 있다.

과대하중에 의한 지연인자들의 비교는 Fig. 6에 나타내었다. Case II에서, 과대하중의 전단성분이 증가하는  $\phi=60^\circ$ 의 경우는 균열지연길이가 거의 나타나지 않았으며, 균열지연길이의 변화는 피로수명의 결과와 동일한 양상을 나타내었다. Case III에서  $\phi=60^\circ$ 의 경우, 균열지연길이는 짧지만 피로수명이 가장 길게 나온 결과는 과대하중의 영향뿐만 아니라 일정진폭 하중의 작용모드에 크게 영향을 받았음을 확인할 수 있었다. 최소균열전파속도의 변화는 Fig. 6(b)에 나타내었으며, 이의 경향은 피로수명의 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 CTS 시험편을 이용하여 단일과대 및 일정진폭의 하중모드를 변화시켜 피로균열의 전파실험을 수행하였으며 이로부터 아래와 같은 실험적 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 단일과대하중의 작용모드 변화에 따라 각 균열전단의 변형양상은 전단하중성분의 증가에 따라 비대칭 형상과 두께방향으로의 변화에 차이를

보였으며, 이것이 이후 일정진폭 하중 하의 피로균열의 전파거동에 영향을 미칠 것임을 유추할 수 있었다.

(2) 일정진폭 하중 하에서 피로수명은 작용하중의 전단성분이 증가할수록 균열전진력 감소로 인하여 증가하였으며, 혼합모드 I+II 하중 하에서 피로균열은 초기 균열선상에 대하여 편향 전파하였다.

(3) 단일과대하중과 일정진폭 하중에서 작용모드의 조합에 따라 피로수명은 큰 차이를 보였다. 과대하중으로 인한 지연효과는 모드 I 상태일 때 가장 컸으며, 일정진폭 하중 하에서 피로균열의 전파거동은 작용하중의 전단성분에 의한 영향을 크게 받았다. 피로수명은 과대하중과 일정진폭 피로하중의 조합에 따라 고려하여야 함을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Qian, J. and Fatemi, A., "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 55, No. 6, pp. 969-990, 1996.
2. Wei, R. P. and Shih, T. T., "Delay in Fatigue Crack Growth," *International Journal of Fracture*, Vol. 10, pp. 77-85, 1974.
3. Mills, W. J. and Hertzberg, R. W., "The Effect of Sheet Thickness on Fatigue Crack Retardation in 2024-T3 Aluminum Alloys," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 705-711, 1975.
4. Stephens, R. I., Chen, D. K., and Hom, B. W., "Fatigue Crack Growth with Negative Stress Ratio Following Single Overloads in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys," *ASTM STP592*, pp. 27-40, 1976.
5. Fleck, N. A. and Pickard, A. C., "Effects of Overloads on Fatigue Crack Propagation: Aluminum Alloys," *Met. Sci.*, Vol. 11, pp. 399-404, 1977.
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. Elber, W., "Fatigue Crack Closure Cyclic Tension," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 37-45, 1970.
8. 송삼홍, 권윤기, "변동하중하에서의 피로크랙 지연현상과 지연기구에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제 14 권, 제 6 호, pp. 83-89, 1997.
9. 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.