

## 강의 피로균열지연거동에 미치는 과대하중의 영향과 통계적 변동에 관한 연구

김 선 진\* · 남 기 우\*\* · 김 종 훈\*\*\* · 이 창 용\*\*\* · 박 은 희\*\*\* · 서 상 하\*\*\*  
(97년 5월 31일 접수)

### Influence of Overload on the Fatigue Crack Growth Retardation and the Statistical Variation

Seon Jin Kim\* · Ki-Woo Nam\*\* · Jong-Hoon Kim\*\*\* · Chang-Ryong Lee\*\*\* ·  
Eun-Hee Park\*\*\* · Sang-Ha Seo\*\*\*

**Key Words** : Crack Retardation(균열지연현상), Multiple Overload(다중과대하중), Plastic Zone Size(소성역크기), Number of Overload Application(과대하중 작용수), Probability Distribution Function(확률분포), COV(변동계수) Minimum Crack Growth Rate(최소균열전파율)

### Abstract

Constant  $\Delta K$  fatigue crack growth rate experiments were performed by applying an intermediate single and multiple overload for structural steel, SM45C. The purpose of the present study is to investigate the influence of multiple overloads at various stress intensity factor ranges and the effect of statistical variability of crack retardation behavior. The normalized delayed load cycle, delayed crack length and the minimum crack growth rate are increased with increasing baseline stress intensity factor range when the overload ratio and the number of overload application were constant. The crack retardation under low baseline stress intensity factor range increases by increasing the number of overload application, but the minimum crack growth rate decreases by increasing the number of overload application. A strong linear correlation exists between the minimum crack growth rate and the number of overload applications. And, it was observed that the variability in the crack growth retardation behavior are presented, the probability distribution functions of delayed load cycle, delayed crack length and crack growth life are 2-parameter Weibull. The coefficient of variation of delayed load cycle and delayed crack length for the number of 10 overload applications data are 14.8 and 9.2%, respectively.

\* 부경대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 부경대학교 공과대학 재료공학과

\*\*\* 부경대학교 대학원 기계공학과

## 1. 서 론

기계·구조물의 파괴사례의 대부분은 피로에 기인한 것이 많지만, 피로균열전파수명에는 무시할 수 없는 변동이 존재하므로, 피로균열전파에 관한 최근의 연구는 불확정성을 고려한 신뢰성공학적 해석이 많다<sup>1)~3)</sup>.

피로균열전파의 과정 중에 일련의 과대하중을 받게 되면, 균열의 전파율이 급격히 감소하는 지연현상(retardation)이 발생하게 된다<sup>4)</sup>. 실제 구조물에 적용되고 있는 변동하중하의 연구에 대해서는 많은 연구의 대부분이 단일 과대하중(single overload) 하에 의한 균열전파의 지연현상에 관한 연구가 많으며, 현재까지의 연구에서 제안되고 있는 이러한 지연현상에 대한 기구로는 균열선단에서의 압축잔류응력과 관련한 소성 영역의 효과<sup>5)6)</sup>(crack tip plasticity), 균열의 닫힘<sup>7)</sup>(crack closure), 균열선단의 둔화<sup>8)</sup>(crack tip blunting), 균열선단의 변형경화<sup>9)</sup>(crack tip strain hardening), 균열선단의 가지현상<sup>10)</sup>(crack tip branching) 등을 들 수 있다. 과대하중에 의한 지연현상의 이러한 기구는 변동하중하의 균열의 거동 파악이나 수명예측에 기초가 되므로 많이 연구되고 있지만, 지금까지의 피로균열 지연거동에 대한 연구는 확정론적인 연구가 대부분이며 이들 또한 단일 과대하중하에 의한 것이 대부분이다. 피로균열전파가 본래 확률적 현상<sup>11) 12)</sup>이라는 것은 널리 알려진 사실이다. 따라서 피로균열 전파중에 과대하중이 작용하게 되면 재료 특성의 변동에 하중의 변동이 작용하여 더욱 확률·통계적 취급의 필요성이 요구된다고 하겠다. 그러므로 과대하중에 의한 지연현상도 확정적으로 평가하는 데는 위험측의 예측이 될 가능성이 있다고 생각된다. 또한, 단일 과대하중에 의한 지연현상의 파악도 중요하지만, 실제의 기기나 부재에 작용하는 일련의 소수회의 과대하중(multiple overload)이 작용하는 경우는 실용적으로 중요한 문제<sup>11,12)</sup>이며 큰 의의를 갖는다고 할 수 있다. 그러나 이러한 소수회의 과대하중이 작용하는 경우에 대한 지연현상에 관한 연구는 아주 미약한 실정이다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 소수회의 연속 반복 과대하중에 의한 피로균열지연거동과 통계적 변동을 고찰할 목적으로, 일반 기계구조용강 SM45C를 이용하여 일정  $\Delta K$  제어 피로균열전파

시험을 수행하여 지연현상에 미치는 과대하중의 영향을 고찰하고, 지연거동에 대한 파라미터의 통계적 변동을 검토하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용한 시험편 재료는 일반 기계구조용강인 SM45C로, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타낸다. 시험편의 형상은 ASTM E647-83의 규정에 의하여 가공한 폭( $W$ )이 100mm 그리고 두께( $B$ ) 12mm인 CT시험편이며, 채취방향은 압연방향과 균열의 전파방향이 직각(L-T direction)이 되도록 하였다.

Table 1 Chemical composition(wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Al
SM45C	0.47	0.20	0.74	0.01	0.18	0.01

Table 2 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Hardness ( $H_B$ )
SM45C	610MPa	342MPa	23.0%	170

피로시험은 상온의 대기중에서 행하였으며, 본 피로시험에 이용한 실험 시스템은 시험편에 하중을 부하하는 용량 10톤의 전기유압 서보 피로시험기(Shimadzu Servopulser EHF-ED100kN), 서보 시험기를 움직이는 유압펌프, 실험의 제어 등을 행하는 컴퓨터, 균열길이를 산출하기 위한 균열개구변위 측정장치, 그리고 주변기기 등으로 구성하였으며, 실험중 모든 장치가 자동으로 작동하도록 하였다.

일정 진폭하중하의 피로균열전파시험은 거시적으로 응력상태를 일정으로 유지하고 있지만, 균열이 전파함에 따라 균열선단의 파괴조건,  $\Delta K$ 가 증가하게 된다. 이것은 피로균열전파거동의 변동과 지연현상에 미치는 균열길이의 영향과 하중의 차이를 구별하는데 좋은 방법이라고 할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 일정  $\Delta K$  제어 피로시험을 수행하였다. 이는 지연현상을 고찰하는데 매우 유효한 방법이라 할 수 있다<sup>13)</sup>.

시험조건은 응력반복속도 10Hz, 응력비( $R$ ) 0.2

의 정현파로 하였다. 제어한 기준응력확대계수범위  $\Delta K_b$ 는 25, 30, 37.5 및 45MPa $\sqrt{m}$ 의 4종류이고, 과대하중비는 1.25, 1.5 및 1.75에 대하여 수행하였다. 한편, 지연현상에 미치는 과대하중 작용수  $N_p$ 의 영향을 조사하기 위하여,  $\Delta K_b$ 가 25MPa $\sqrt{m}$ 인 경우에 있어서  $N_p$ 를 1, 10, 50 및 100의 경우에 대하여도 실험을 수행하였다.

과대하중은 균열길이가 약 40mm 전파하였을 때 수동으로 작용시켰으며, 과대하중의 부하시간은 전 시험편에 대하여 1.0Hz로 일정하게 하였다. 과대하중을 부하한 후 지연현상이 발생할 때 지연하중 반복수  $N_d$ 와 지연된 균열길이  $a_d$ 를 실험결과로 부터 계산하였다. 본 실험의 지연현상에 대한 전형적인 모식도를 Fig. 1에 나타낸다. 지연과정은 지연된 균열길이와 지연된 하중반복수의 두 가지 파라미터로 잘 설명할 수 있다.

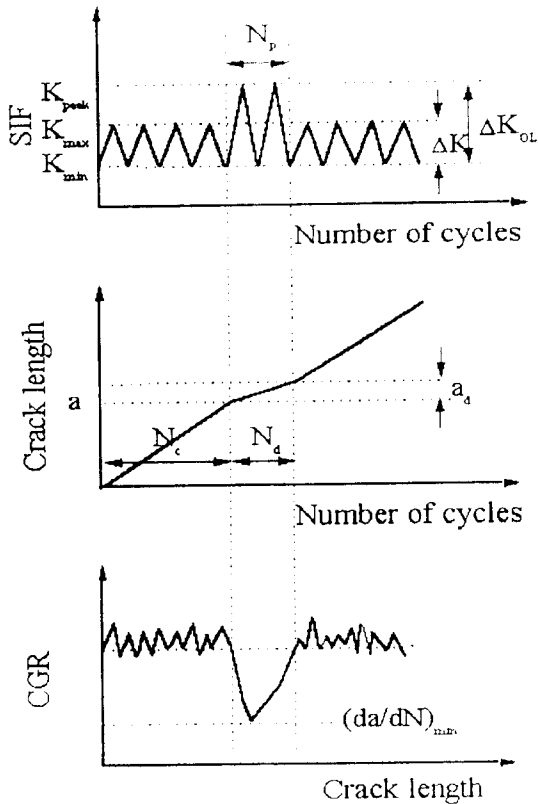


Fig. 1 Schematic illustration of the crack retardation phenomenon

한편, 균열길이의 측정은 피로시험중에 하중과 클립 게이지로 부터 측정한 균열개구변위를 자동 계측하여 Ashok Saxena 등이 제안한 식<sup>14)</sup>을 사용하여 구하고, 균열길이가 약 0.5mm 증가할 때 마다 균열길이  $a$ , 응력반복수  $N$ , 응력확대계수범위  $\Delta K$ , 최대하중, 최소하중, 최대개구변위, 최소개구변위 등을 플로피 디스크에 자동으로 기록하였다.  $\Delta K$ 는 ASTM E647-83에 의하여 계산하였으며, 피로균열전파율은 시이컨트법으로 구하였다. 또한 지연현상을 고찰하기 위하여 파면도 관찰하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 피로균열전파율의 검토

두께 12mm, 응력비( $R$ ) 0.2, 과대하중비( $OLR$ ) 1.5 그리고 과대하중 작용수( $N_p$ ) 10인 조건하에서 얻은 응력반복수  $N$ 과 균열길이  $a$ 의 관계의 일례를 Fig. 2에 나타내었다. 횡축에는 균열길이가 25.0mm에서 전파하는 것으로 기준화하였다. 그림에서 알 수 있듯이,  $a \sim N$ 곡선은 과대하중 작용전까지 거의 직선형태를 나타내고 있으며 과대하중이 작용한 후에는 지연현상이 일어나고 그 후 서서히 과대하중 이전의 정상적인 곡선으로 됨을 보이고 있다. 그러나, 동일  $\Delta K_b$ 에 대한 시험편에 있어서도 과대하중의 작용전, 작용후에 대한 각 시험편의 곡선의 기울기가 다르고, 각 시험편의 평균전파율 또는 평균피로균열전파저항에 변동이 있다는 것을 알 수 있다. 이는 Virkler<sup>11)</sup> 등의 일정진폭하중하의 실험결과와 일치하며, 피로균열전파율에는 명백히 변동이 있음을 보여준다. 이러한 변동은 단순히 시험편 형상이나 하중과 같은 량의 변동에 기인하는 것 보다는 피로균열전파의 미시적 과정 그 자체가 본질적으로 확률적 특성을 가진다고 할 수 있으며, 외력이 불규칙하다면 더욱 확정적으로는 수명예측을 행하는 것은 위험측의 예측이 될 가능성이 높다고 할 수 있다.

한편, 본 실험의 피로균열전파 단계를 알아보기 위하여 응력확대계수범위와 과대하중 작용

이전의 평균피로균열전파율과의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. Paris-Erdogan법칙<sup>15)</sup>에 적용하면,  $m$ 과  $C$ 의 값은 각각 3.38 및  $1.88 \times 10^{-9}$ 를 얻었다. 본 실험의 범위는 피로균열전파의 제2단계 안정전파영역에 속하며, 파면의 형태는 스트라이에이션을 형성하며 전파하는 것을 알 수 있었다.

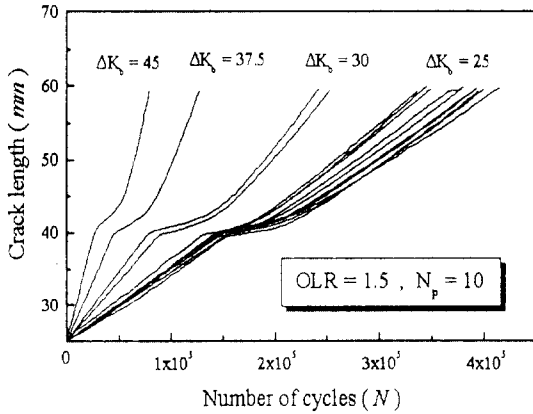


Fig. 2 a-N curves

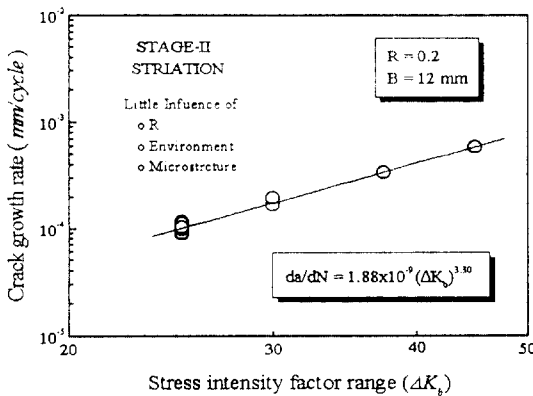


Fig. 3 Relation between mean  $da/dN$  and  $\Delta K$

Fig. 4는 피로균열전파시험의 전 과정에 대한  $da/dN$ 의 관계를 균열길이  $a$ 에 대해서 나타낸 일례이다. 모두  $OLR=1.5$ ,  $N_p=10$ 의 경우이다. 과대하중 작용후에는 전파율이 급격히 감소하다가 최소에 이르고 다시 서서히 증가하는 지연현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이

$\Delta K_b$ 가 증가함에 따라 지연수명과 지연 균열길이도 증가함을 알 수 있다.

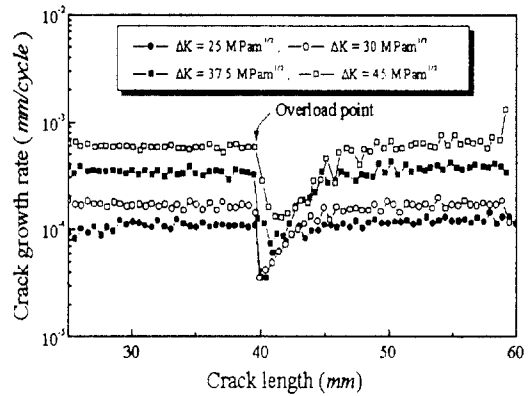


Fig. 4 Variations of fatigue crack growth rate

### 3.2 피로균열지연거동에 미치는 과대하중의 영향

Fig. 5는  $OLR=1.5$ ,  $N_p=10$ 인 경우에 있어서, 기준 응력확대계수범위가 지연현상에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 횡축은 지연수명  $N_d$ 을 과대하중 작용 이전의 전파수명  $N_c$ 로 평균화한  $N_d/N_c$ 를 취하였다. 그림에서 알 수 있듯이  $N_d/N_c$ 는  $\Delta K_b$ 가 증가함에 따라 증가함을 보이고 있다. 이의 결과는 알루미늄 합금의 결과<sup>16)</sup>와 일치하는 경향이었다. 그러나, 이와는 반대로 티타늄 합금<sup>17)</sup>, HT80강<sup>18)</sup>에서는 거의  $\Delta K_b$ 에 의존하지 않는 연구 결과도 있다. 지연거동은  $\Delta K_b$ 에 관계가 있음을 알 수 있다. 한편, 과대하중작용 이후의 평균 최소전파율  $(da/dN)_{min}$ 과 기준응력확대계수범위의 관계를 Fig. 6에 나타내었다.  $\Delta K_b$ 가 25, 30, 37.5 및 45에서 각각  $2.92 \times 10^{-5}$ ,  $3.44 \times 10^{-5}$ ,  $7.46 \times 10^{-5}$  및  $1.24 \times 10^{-4}$ 를 얻었다. 즉, 대수 좌표상에서  $\Delta K_b$ 가 증가함에 따라  $(da/dN)_{min}$ 도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이들의 상관관계식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{min} = A(\Delta K_b)^p \quad (1)$$

여기서,  $A=5.0 \times 10^{-9}$ ,  $p=2.63$ 의 값을 얻었다.

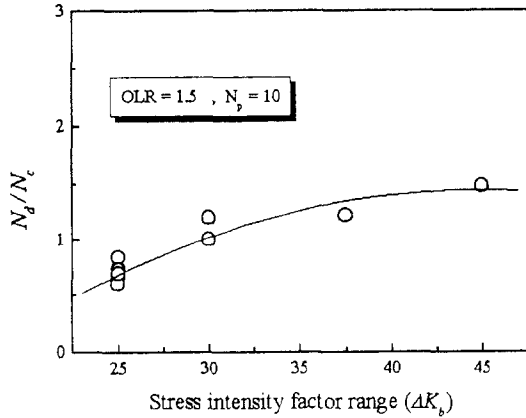


Fig. 5 Effect of  $\Delta K_b$  on  $N_d/N_c$ .

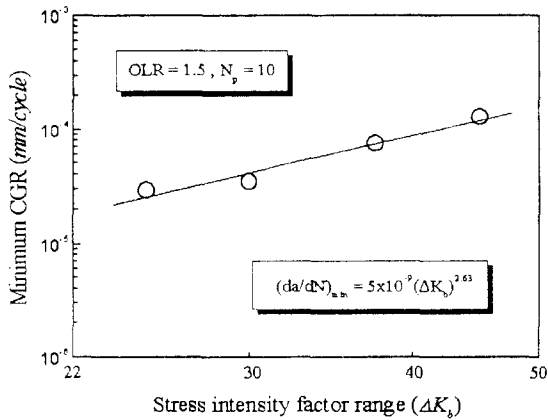


Fig. 6 Relation between  $(da/dN)_{min}$  and  $\Delta K_b$

Fig. 7은  $\Delta K_b=25$ 와  $OLR=1.5$ 의 일정한 조건하에서 균열지연거동에 미치는 과대하중 작용수의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 과대하중의 작용수가 증가함에 따라  $N_d/N_c$ 도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 Dhar<sup>11)</sup>, Bathias<sup>19)</sup> 등의 실험 결과와도 일치하는 경향이였다.

Fig. 8은  $\Delta K_b=25$ 와  $N_p=10$ 의 일정한 조건하에서 균열지연거동에 미치는 과대하중비의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 과대하중비가 증가하면 지연수명도 증가함을 알 수 있다. 이는 타의 실험결과들과 잘 일치하는 경향이였다.<sup>18),19)</sup>

과대하중 작용후의 최소전파율과 지연수명과의

상관관계를 조사하기 위하여 전 시험편의 실험결과에 대한 이들의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 그림내의 점선은 95% 신뢰수준을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 이들 사이에는 양대수 좌표상에서의 상관관계가 존재하며, 만일  $(da/dN)_{min}$ 을 안다면 지연수명을 예측할 수 있다. 이들의 상관관계 실험식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{min} = B(N_d)^q \quad (2)$$

여기서,  $B=2.14 \times 10^7$ ,  $q=-1.38$ 의 값을 얻었다. 본 결과는 기준 응력확대계수범위 25~45MPa√m, 응력비 1.25~1.75, 과대하중 작용수 1~100사이의 경우이다. 그러나, 타의 응력범위와 다른 재료에 대해서는 이들의 상관관계는 조사되어야 한다.

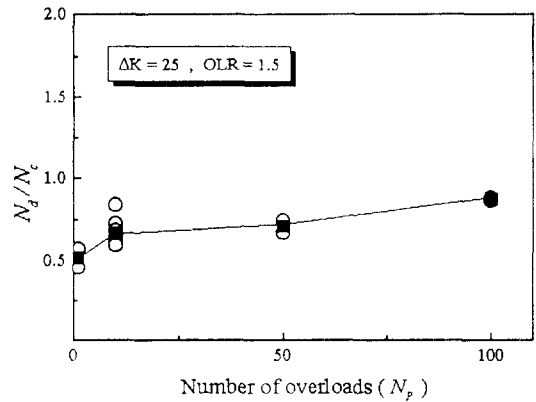


Fig. 7 Effect of  $N_p$  on  $N_d/N_c$

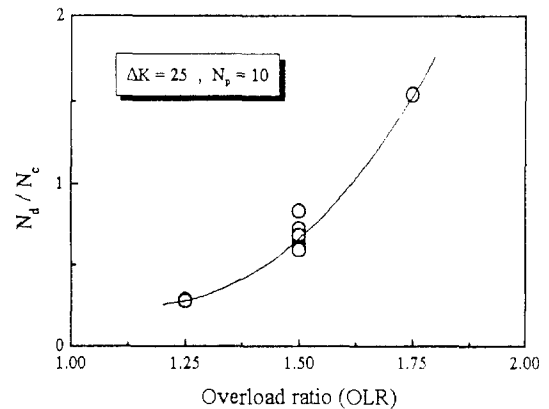


Fig. 8 Effect of  $OLR$  on  $N_d/N_c$

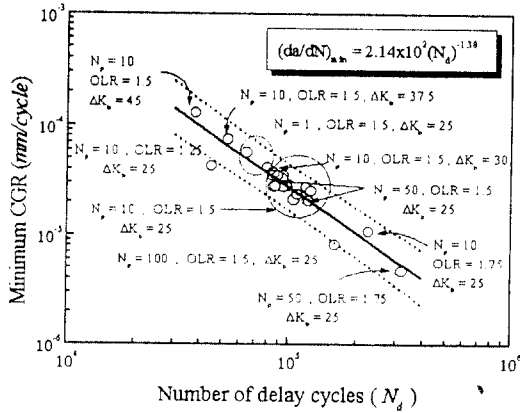


Fig. 9 Relation between minimum growth rate and the number of delay cycles.

### 3.3 파면 관찰

Fig. 10은 각 조건하에서의 파면의 거시적 양상을 나타낸 일레이다. 그림에서 알 수 있듯이 과대하중을 작용시킨 부근에서 균열선단은 비치 마크

모양의 검은 띠 형상을 관찰 할 수 있다. 이상의 그림에서 알 수 있듯이 거시적 파면의 형태는 주로  $N_p$ , OLR 및  $\Delta K_b$ 에 의존함을 알 수 있고, 또한 동일 조건의 시험편에 있어서도 다소 차이가 있음을 알았다. 이러한 것이 지연현상 및 지연거동의 통계적 변동에 영향을 주리라 생각된다. 즉, 하중상호간의 영향에 의해 균열지연이 아주 복잡한 양상을 보이는 것은 분명하며, 이러한 파면의 결과는 과대하중에 의해 형성되는 소성역에 의한 압축잔류 응력이 균열의 지연현상을 설명하는데 있어서 지연현상을 초래하는 하나의 중요한 지배 기구임을 시준해 준다고 생각된다.

한편,  $N_p=10$ , OLR=1.5에서의 과대하중 작용 부근에서의 균열 표면의 일례를 Fig. 11에 나타낸다. 그림 상은  $\Delta K_b=25MPa\sqrt{m}$ 의 경우로 과대하중의 작용에 의한 균열선단의 균열 가지는 그렇게 형성되고 있지 않음을 보여주고 있으나, 그림 하의  $\Delta K_b=37.5MPa\sqrt{m}$ 인 경우에 있어서는 과대하중의 작용에 의하여 균열선단에서의 균열가지 현상이

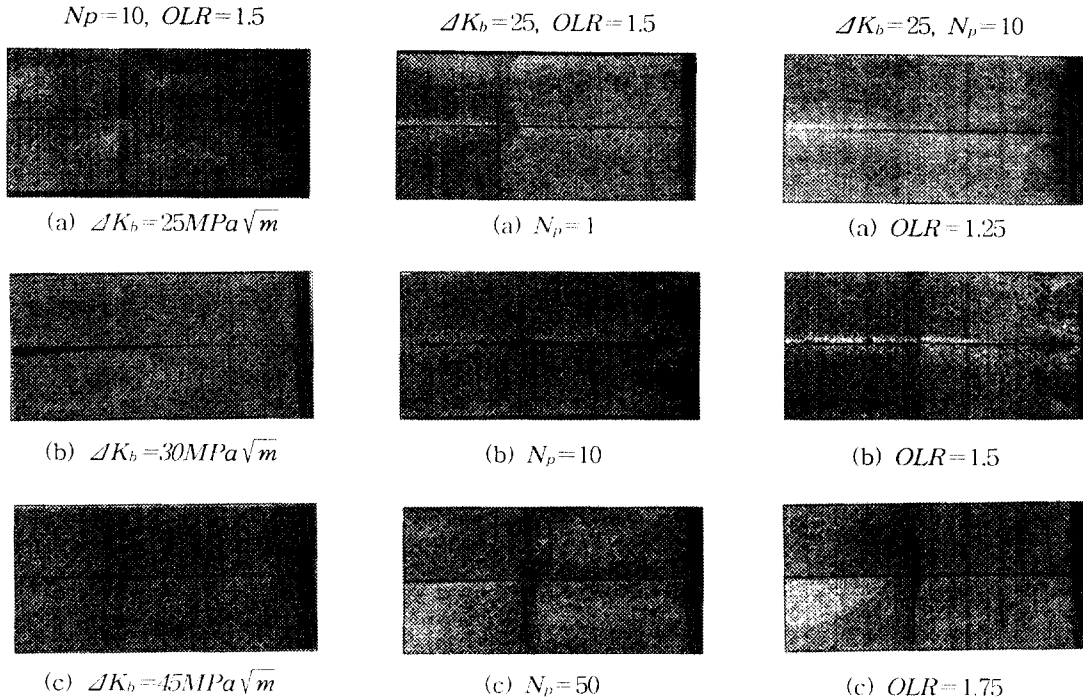


Fig. 10 Fracture surface macrophotology

전자에 비하여 비교적 많이, 그리고 균열가지의 크기도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 가지 현상을 비교하면, 비교적 낮은  $\Delta K_b$ 에서는 균열선단의 가지 현상에 의한 것보다는 소성 변형에 의한 균열선단의 압축잔류 응력 등과 같은 것에 의하여 지연거동에 영향을 미침을 알 수 있고, 비교적 큰  $\Delta K_b$ 위에서는 균열선단의 균열가지의 형성에 의해 균열전파력도 감소하여 지연거동에 영향을 줄 것으로 사료된다. 따라서,  $\Delta K_b$ 가 큰 범위에서 과대하중에 의한 지연현상의 평가시에는 이러한 균열가지 현상도 포함하여 고려하여야 할 것으로 판단된다.



← Propagation direction



Fig. 11 Microstructure of specimen surface

Fig. 12는 과대하중 작용 전후의 시험편 중앙부에서의 미시파면을 SEM에 의해 관찰한 예이다.

과대하중 작용전후의 파면 양상이 다름을 알 수 있다. 과대하중 작용전의 미시파면의 양상은 전형적인 스테이지 II의 피로파면을 나타내는 스트라이에이션을 잘 관찰 할 수 있으나, 과대하중 작용 부근에서는 보이드가 관찰되었고 또한 균열은 준벽개(quasi-cleavage) 형상과 비슷하게 전파한 후 점진적으로 스트라이에이션이 형성됨을 알 수 있다. 이와 같이 지연구간에서는 균열의 성장 거동 형태에 변화가 있었음을 보여주는 결과라 할 수 있다<sup>19)</sup>. 다중 과대하중의 작용에 의한 소성변형의 유입으로 압축 잔류응력과 변형 경화, 균열선단의 무더짐 그리고 잔가지 현상 등에 의한 전파력의 감소 등 여러 가지의 인자에 의하여 균열전파력을 감소시키는 복잡한 양상을 띠고 있다고 생각된다.

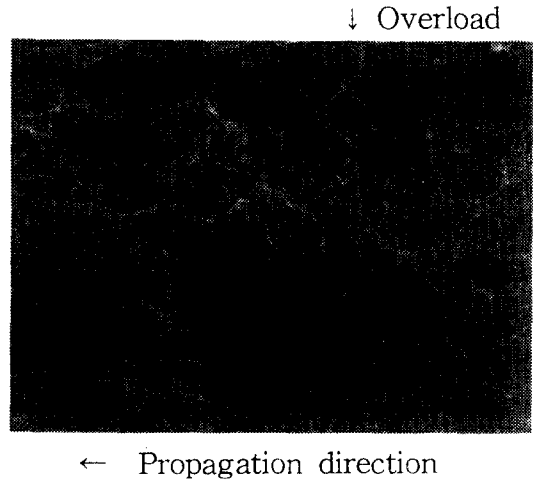


Fig. 12 Fracture surface micromorphology

### 3.4 피로균열지연거동의 통계적 변동

지금까지 제안된 확률지연 모델<sup>20, 23)</sup>은 실험이나 지리상의 편리를 위해서도 반드시 정확하게 지연 거동의 실질을 반영하고, 설계 혹은 보수 상에 있어서 간결한 취급법을 제공하고 있다고 하기에는 어렵다. 이러한 관점에서 확률모델을 설정하기 위해서는 무엇보다도 우선적으로 균열지연거동의 통계적 특성의 현상 파악이 중요하다는 취지에서, 본 연구에서는 실험조건을 일정하게 하여 통계적 변동성을 검토하였다. 균열가지의 영향이 비교적

적은  $\Delta K_b=25\text{MPa}\sqrt{m}$ ,  $N_p=10$ 의 일정 조건의 실험으로부터 얻은 10개 표본의 전파곡선에서 소정의 균열길이 25mm 에서 각각 35, 40, 45, 50 및 55mm 에 도달할 때까지의 전파수명  $N(a_T)$ 를 구하여 2-parameter Weibull확률분포로 나타낸 것이 Fig. 13이고, 그림중의 실선은 그 분포함수로 근사한 것이다. 과대하중 작용 이전의 수명의 변동계수는 7.25%로 비교적 일정하였으며, 과대하중 작용 후의 지연에 의한 수명의 변동계수는 과대하중 이전보다 다소 큰 값을 보이고 있다. 즉, 과대하중이 작용하면 하중의 상호작용 등에 의한 수명의 변동이 증가함을 알 수 있고 이들 수명의 파악에는 주의가 요구된다고 할 수 있다.

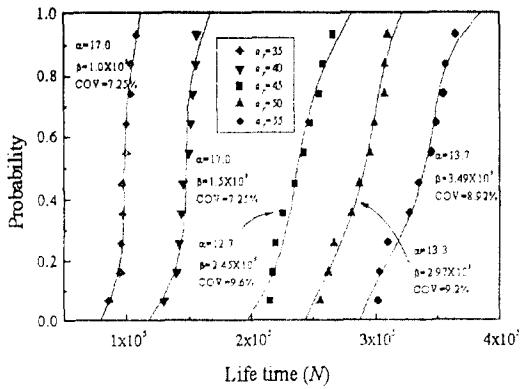


Fig. 13 Distribution functions of crack growth life

과대하중에 의한 지연수명과 지연된 균열길이의 분포를 Fig. 14에 나타낸다. 그림의 실선은 2 parameter Weibull분포로 근사한 것이다. 여기서,  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값은 지연수명의 경우가 각각 8.02, 0.7이고, 지연 길이의 경우가 각각 13.2, 6.06이었다. 지연수명이 지연길이 보다 넓게 분포함을 알 수 있고, 그 변동계수는 각각 14.8%, 9.2%였다. 지연 길이의 변동계수는 45mm 에 도달할 때까지의 전파수명  $N(a_T)$ 의 변동계수와 비슷한 값을 얻었다. 이상에서 보는 바와 같이, 지연길이의 변동보다는 지연수명의 변동이 크다는 것을 알 수 있고, 과대하중에 의한 지연거동의 추정은 지연길이의 예측보다는 지연수명의 예측이 안전측의 추정이 된다고 할 수 있다.

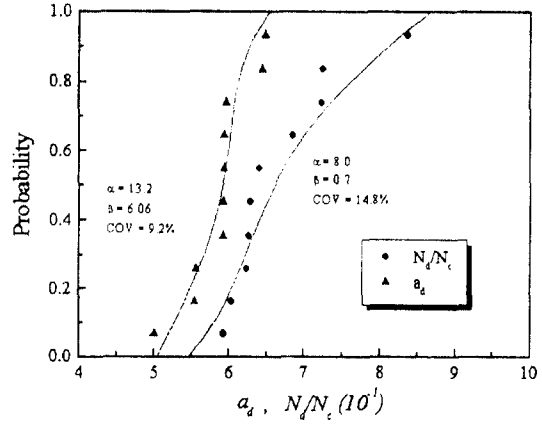


Fig. 14 Distribution functions of  $N_d/N_c$  and  $a_d$

Fig. 15는 과대하중 작용후의 피로균열 최소전파율의 변동을 나타낸 것이다. 비교적 가우스분포에 근사하고 있음을 알 수 있다. 가우스분포에 근사한 평균과 표준편차는 각각  $2.89 \times 10^{-6}$ ,  $6.57 \times 10^{-6}$ 의 값을 얻었다. 한편, 표본의 평균값은 2.92였다.

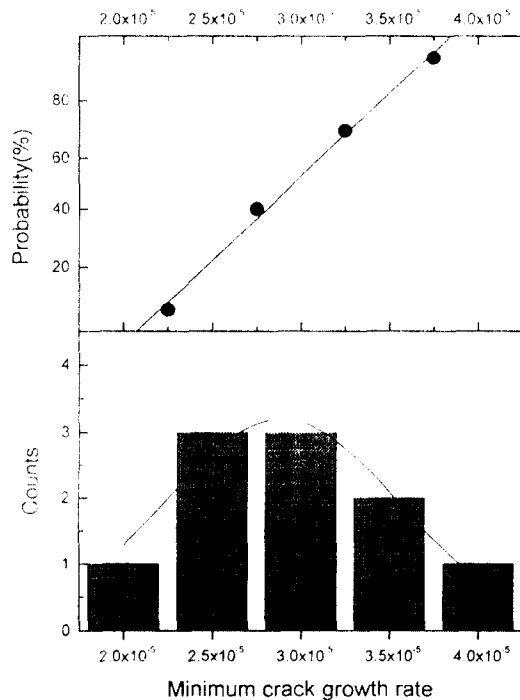


Fig. 15 Gaussian distribution of minimum crack growth rate



한편, 과대하중 작용이후의 전파율의 변동계수를 과대하중작용 이후의 균열길이  $\delta a$ 에 대하여 나타낸 것이 Fig. 16이다. 그리고, 지연전파율을 예측하는 Wheeler의 모델<sup>5)</sup>에 의한 지연계수  $C_p$ 를 다음 식(3)으로 계산하여, 과대하중 작용이후의 균열길이  $\delta a$ 에 대한 변동계수도 동일 그림에 나타내었다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{R_{.m}} = \frac{1}{C_p} \left(\frac{da}{dN}\right)_c \quad (3)$$

그림에서  $\circ$ 표는  $da/dN$ 의 나타낸 것이고,  $\square$ 는 정상상태의  $da/dN$ 로 평균화한 것을 나타내며, 또한  $+$ 표는 지연계수의 변동계수를 나타낸다.  $\delta a$ 가 증가함에 따라 균열전파율과 지연계수의 변동은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이로부터 알 수 있듯이, 지연기간중의 지연계수  $C_p$ 의 변동계수는 정상상태의 전파율의 변동계수(5.2%) 보다도 아주 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 과대하중이 작용한 이후의 수mm에서 변동계수가 그 이후의 기간 보다도 약 2배 정도 크며, 이는 지연거동에 있어서 과대하중 작용후 여러 인자들의 영향에 의하여 지연거동의 현상이 복잡하고 또한 그 변동이 심하다고 할 수 있다. 이상에서와 같이, 과대하중에 의한 지연구간에서의 피로균열전파율은 정상상태의 전파율보다 더욱 변동성이 크다는 것을 알 수 있다.

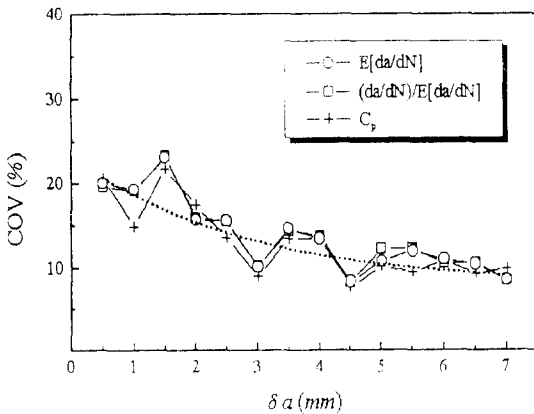


Fig. 16 The coefficient of variation of  $da/dN$  and  $C_p$

#### 4. 고 찰

지연현상은 기계·구조물의 부재 혹은 기기 등의 피로수명에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러나 지연현상은 아주 복잡한 현상이며, 이러한 지연거동을 확실하게 설명할 만한 모델은 개발되지 않은 실정이다.

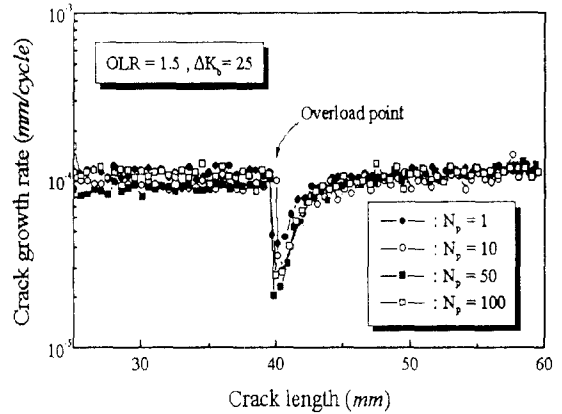


Fig. 17 Relation between crack growth rate and crack length

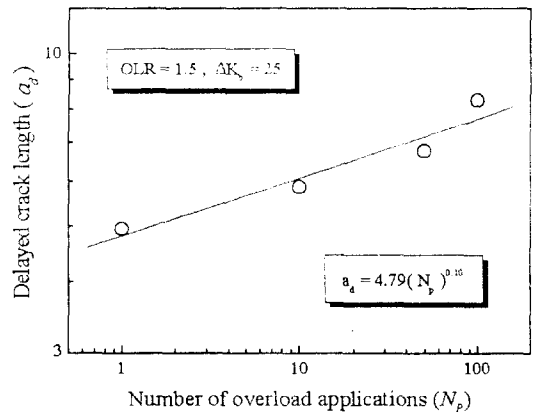


Fig. 18 Relation between  $N_p$  and  $a_i$

Fig. 17은  $\Delta K_b = 25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $OLR = 1.5$ 인 조건하에서, 균열길이에 대한 피로균열전파율을 보여주는 결과의 일례이다. 과대하중 작용후 균열전파율이 급격히 감소하였다가 서서히 증가하고 있는 지연

현상이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 최소전파율에 이르는 균열길이와 최소전파율은 과대하중 작용수에 의해 차이가 있는 것처럼 보인다. 그래서,  $N_p$ 에 의한 이들의 영향을 알아보기 위하여 최소전파율에 이르는 균열길이 및 최소전파율을 구하여 그 관계를 각각 Fig. 18, Fig. 19에 나타낸다.

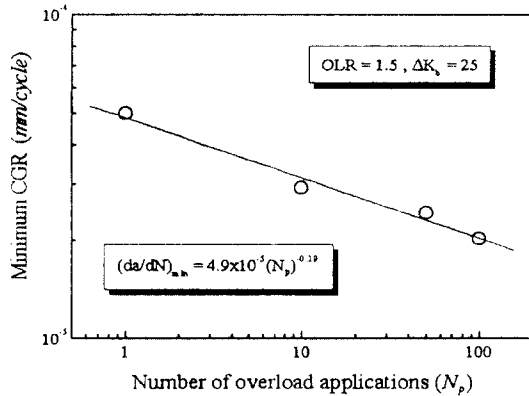


Fig. 19 Relation between  $N_p$  and  $(da/dN)_{min}$

이상에서 알 수 있듯이  $N_p$ 가 증가함에 따라 최소전파율에 이르는 균열길이와 최소전파율은 모두 감소하는 경향이었다.  $N_p$ 와 최소전파율에 대한 상관관계 실험식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{min} = G(N_p)^r \quad (4)$$

여기서,  $G=4.9 \times 10^{-5}$ ,  $r=-0.19$ 의 값을 얻었다. 따라서,  $N_p$ 에 대한 최소전파율을 구할 수 있고, 이 최소전파율로 식(2)에 의해 지연수명을 예측할 수 있다. 이상과 같이  $N_p$ 에 의해 나타나는 지연현상의 영향을 구체적으로 고찰하기 위하여 단일 및 다중 과대하중에 의한 소성영역의 크기의 개념도를 Fig. 20에 나타낸다. ㉑부분은 기준응력확대계수범위에 의하여 형성된 소성영역의 궤적(plastic wake)을 나타내며, ㉒는 과대하중에 의해 형성된 소성영역의 세기이다. ㉓는 과대하중 작용후의 기준 응력확대계수범위에 의하여 형성된 ㉑와 같은 세기의 소성변형의 궤적을 나타낸다.  $N_p$ 의 증가에

의하여 균열에 상응하는 적은 양만큼 소성영역의 궤적이 증가한다. 이러한 과대 잔류변형은 과대하중의 작용 동안 균열선단 바로 근처에서 형성된다고 할 수 있다. 전절의 통계적 변동에서 언급한 바와 같이 과대하중후 지연길이가 수mm 근처에서 큰 변동계수를 보이는 것은 이 과대 잔류변형과 밀접한 관계가 있다고 생각된다. 또한, 최소전파율과 이에 이르는 균열길이는  $N_p$ 의 증가에 따라 압축 잔류응력의 세기와 변형 경화에 의하여 감소하는 것으로 생각된다. 이 최소전파율 부근까지의 수명이 전 지연수명의 약 40-50%를 차지하고 있음을 알 수 있다.

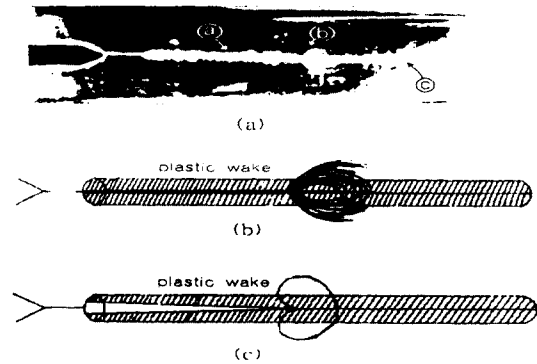


Fig. 20 Relation between experimental plastic zone shape and the theoretical ones

$N_p$ 의 함수로서 과대하중 작용후의 전파율이 정상상태의 전파율과 일치하는 위치를 다음 식의  $S$ 로서 정의한다.

$$S = \frac{a_d}{\omega_{OL}} \quad (5)$$

여기서,  $\omega_{OL}$ 은 Irwin인이 제안한 소성역 크기의 식을 이용하였다<sup>19)</sup>. 단일과대하중의 경우,  $S$ 는 약 0.82의 값을 얻었다. Wheeler의 모델<sup>5)</sup>에 의한  $S$ 는 0.56으로 본 실험 결과가 다소 큰 값을 보이고 있다. Wheeler의 모델에 의한 지연된 균열길이는 3.33mm이다. 본 실험결과에 의한 4.93mm와는 약 1.60mm의 차이를 보이고 있다. 그러나, 단일과대하중의 경우 과대하중에 의한 균열길이는  $\omega_{OL}$ 이

내에 있다. 이는  $\Delta K_b$ ,  $OLR$  및 재질에 의하여 다르다고 생각되며, 여기에 대한 더 많은 고찰이 요구된다. 한편, 다중 과대하중이 작용한 경우에도 단일 과대하중의  $\omega_{OL} (*)$ 를 이용하여 계산한  $S$ 값과  $N_p=1$ 의  $S$ 값을 이용하여 계산한 다중 과대하중의  $(\omega_{OL})_{cal}$ 도 Table 3에 나타내었다.

이상에서와 같이 다중 과대하중이 작용하는 경우에는  $N_p$ 의 증가와 함께 잔류 소성변형의 크기가 증가함에 따라 자연 균열길이도 증가하며, 앞의 고찰에서와 같이 이들 잔류 소성변형의 세기는 다중 과대하중 작용 후 이들 반복 과대하중에 의한 변형 경화와 더불어 균열전단의 바로 수mm 부근에서 집중되는 것을 알 수 있다. 통계적 변동을 고찰하기 위하여  $N_p=10$ 의 전 시험편에 대한  $S$ 를 조사한 결과 평균 0.97, 표준편차 0.074, 변동계수 7.6%의 값을 얻었다. 이러한 변동은 실험에 기초한 소성영역의 형태에 밀접한 관계가 있을 것으로 사료되며 이에 대한 실험과 고찰이 더욱 요구된다.

Table 3 Effect of  $N_p$  on  $S$  and plastic zone size

$N_p$	$a_d(mm)$	$S$	Normalized $S/N_p=1$	$(\omega_{OL})_{cal}$
1	4.93	0.82	1.00	5.98(*)
10	5.83	0.97	1.18	7.11
50	6.02	1.01	1.23	7.34
100	7.48	1.25	1.52	9.12

### 5. 결 론

연속 다중 과대하중에 의한 피로균열지연거동과 통계적 변동을 고찰할 목적으로, 일반 기계구조용강 SM45C를 이용하여  $\Delta K$ 치 일정 제어 피로균열전파 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기준응력확대계수범위  $\Delta K_b$ , 과대하중비  $OLR$  및 과대하중 작용수  $N_p$ 가 증가함에 따라 지연수명도 증가하는 경향이였다.
- (2) 지연구간에서의 거시적 파면의 형태는 비치마크와 같은 검은 띠 모양의 입상의 형태를 관찰 할 수 있었으며,  $N_p$ ,  $OLR$  및  $\Delta K_b$ 가 증가할수록 더욱 선명히 관찰되었다. 다중

과대하중 작용 전후의 미시적 파면 양상은 과대하중작용전에는 스테이지 II의 전형적인 스트라이에이션이 관찰되었으며, 지연구간에서는 보이드가 관찰되었고, 또 준벽개 양상의 균열전파를 관찰 할 수 있었다.

- (3) 비교적 낮은  $\Delta K_b=25MPa\sqrt{m}$ 에서는 다중 과대하중에 의한 균열 가지현상은 그렇게 관찰되지 않았으며, 고  $\Delta K_b$ 의 시험편에서는 균열의 가지현상이 관찰되었다.
- (4) 최소전파율에 이르는 균열길이는  $N_p$ 의 증가와 더불어 감소하였으며, 그 최소전파율도  $N_p$ 의 증가와 더불어 감소하는 경향이였다. 한편, 최소전파율과 지연수명의 사이에는 음의 상관관계가 있음을 알았다.
- (5) 과대하중의 작용수와 최소전파율 사이에도 음의 상관관계가 있음을 알았다. 따라서 과대하중 작용수를 알면 지연수명을 예측할 가능성이 있음을 알았다.
- (6) 전파수명의 분포는 Weibull분포에 따름을 알 수 있었으며, 과대하중 작용이후의 변동계수는 정상상태 보다 크게 나타났다. 또한 지연수명의 분포와 자연 균열길이의 분포도 Weibull분포에 따름을 알 수 있었고, 그 변동계수는 각각 14.8% 및 9.2%로 지연수명의 변동계수가 균열길이의 변동계수보다 크게 나타났다. 그리고, 최소전파율에도 변동이 있음을 알았으며, Gaussian분포에 근사한 평균과 표준편차는 각각  $2.89 \times 10^{-5}$ ,  $6.57 \times 10^{-6}$ 의 값을 얻었다.
- (7) 지연구간 내에서의 지연 전파율 및 Wheeler의 지연계수의 변동계수는 정상상태 전파율의 변동계수보다도 2~4배, 크게 나타났다.
- (8)  $N_p=10$ 의 전 시험편에 대한  $S$ (과대하중 작용후의 전파율이 정상상태의 전파율과 일치하는 위치)의 변동을 조사한 결과 평균 0.97, 표준편차 0.074의 값을 얻었다.
- (9) 과대하중에 의하여 형성된 소성영역의 형태는 복잡한 형상을 나타냈으며, 동일 다중 과대하중의 작용에 있어서도 시험편간 서로 차이가 났다. 이는 다중 과대하중의 상호 효과와 재질에 의하여 전파력에 큰 영향을 주

고, 다중 과대하중에 의해 형성된 소성영역의 형태는 전파경로 및 피로균열지연거동에 영향을 미친다고 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME96-C-08)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Virkler, D. A., Hillberry, B. M. and Goel, P. K., "The Statistical Nature of Fatigue Crack Propagation", ASME J. Eng. Mat. and Tech., Vol.101, pp.148-153, 1979
- 2) Ortiz, K. and Kiremidjian, A. S., "Time Series Analysis of Fatigue Crack Growth Data", Eng. Fract. Mech., Vol.24, No.5, pp.657-675, 1986
- 3) Itagaki, H., Ishizuka, T. and Huang, P. Y., "Reliability Assessment by Simulation of Fatigue Crack Growth", Naval Arch. and Ocean Eng. of Japan, Vol.165, pp.253-261, 1989
- 4) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice-Hill, 1990
- 5) Wheeler, O. E., "Spectrum Loading and Crack Growth", ASME J. Basic Eng., Vol.D94, No.1, pp.181-186, 1972
- 6) Willenborg, J., Engle, R. M. and Wood, H. A., "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept", AFFDL TM-71-1-FBR, 1971
- 7) Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure in Damage Tolerance in Aircraft Structure." ASTM STP. 486, pp.230-242, 1971
- 8) Fleck, N. A., "Influence of Stress State on Crack Retardation", ASTM STP.924, pp.157-183, 1988
- 9) Knott, J. F. and Pickard, A. C., "Effects of Overloads on Fatigue Crack Propagation : Alluminum Alloys", Met. Sci. Vol.11, pp.399-404, 1977
- 10) Suresh, S., "Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Retardation Following Overloads", Eng. Fract. Mech., Vol. 18, No.3, pp.577-593, 1983
- 11) Dhar, S., "Influence of Multiple Overload on Fatigue Crack Retardation in High Strength Low Alloy Structural Steel", Advanced in Fracture Research, Vol.2, pp.1395-1403, 1989
- 12) Jacoby, G. H., Nowack, H. and van Lipzig, H. T. M., "Experimental Results and a Hypothesis for Fatigue Crack Propagation Under Variable Amplitude Loading", ASTM STP 595, pp.172-183, 1976
- 13) Bernard, P. J., Lindley, T. C. and Richards, C. E., "Mechanisms of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 595, pp.78-97, 1976
- 14) Ashok Saxena and Hudak, S. J., "Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens", Int. J. Fract., Vol.14, No.5, pp.453-462, 1978
- 15) Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", ASME J. Basic Eng., Vol.55, pp.528-534, 1963
- 16) von Euw, E. F. J., Hertzberg, R. W. and Robeuts, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 513, pp.230- , 1972
- 17) Wei, R. P. and Shih, T. T., "Delay in Fatigue Crack Growth", Int. J. Fract., Vol.10, pp.77-85, 1974
- 18) Matsuoka, S., Tanaka, K. and Kwahara, M., "The Retardation Phenomenon of Fatigue Crack Growth in HT80 Steel", Eng. Fract. Mech., Vol.8, pp.507-523, 1976

- 19) Goel, H. S. and Chand, S., "A Fatigue Crack Growth Model for Single Overload Tests", ASME J. Eng. Mat. and Tech., Vol.116, pp.168-172, 1994
- 20) Bathias, C. and Vancon, M., "Mechanisms of Overload Effect on Fatigue Crack Propagation in Aluminum Alloys", Eng. Fract. Mech., Vol.10, pp.409-423, 1978
- 21) Ditlevsen, O. and Sobczyk, K., "Random Fatigue Crack Growth with Retardation", Engng. Fract. Mech., Vol.24, pp.861-878, 1986
- 22) Arone, R., "On Retardation Effects During Fatigue Crack Growth Under Random Overloads", Eng. Fract. Mech., Vol.27, pp.83-89, 1987
- 23) Arone, R., "Influence of Random Overloads on Fatigue Crack Lifetime and Reliability", Eng. Fract. Mech., Vol.30, pp.361-371, 1988
- 24) Sobczyk, K. and Trebicki, J., "Cumulative Jump-Related Model for Fatigue", Eng. Fract. Mech., Vol.40, pp.201-210, 1991
- 25) Klesnil, M. and Lukas, P., "Fatigue of Metallic Materials", Elsevier Science Publishers, 2nd ed., 1992