

# 一定應力 및 過大·過小應力下에서의 疲勞크랙 發生傳播舉動

## Fatigue Crack Behavior under Constant Stress and Periodic Overstressing

宋 森 弘\* 李 京 魯\*\*  
S. H. Song, K. R. Lee

### ABSTRACT

It is experimented under rotary bending stress that the spacing of two micro hole flaws is adjacent and that it is distant. In order to observe the behavior of fatigue crack propagation, two kinds of specimens are tested under constant stress and periodic overstressing. Although the crack occurs faster when two micro-hole flaws are adjacent than when they are distant, but there is no difference of the number of fracture cycles between two. The crack propagates slower under low-high block stress than under high-constant stress, and it propagates faster under high-low block stress than under low-constant stress. The influence of two-step block stress is serious right after the stress varies.

### 기 호 설 명

- $D$  : 시험편의 지름(mm)
- $d$  : 미소 원공결함의 지름(mm)
- mHv : 마이크로 비커스 경도값
- $h$  : 미소 원공결함의 깊이(mm)
- $K$  : 응력 확대계수( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )
- $L$  : 미소 원공결함의 중심간 길이의 1/2(mm)
- $c$  : (피로표면)크랙길이(mm)
- $N$  : 반복회전수(cycle)
- $N_f$  : 파단수명(cycle)
- $r$  : 미소 원공결함의 반지름(mm)
- $r_p(\theta)$  : 소성영역의 크기(mm)
- $\sigma$  : 응력(MPa)

### 1. 서 론

피로한도 혹은 파단수명의 저하의 원인으로 서 주로 결함의 존재가 지적되고 있다. 피로 크랙거동에 미치는 결함의 영향은 결함의 형상<sup>1)</sup>, 치수<sup>2)</sup>, 그리고 방향과 위치<sup>3)</sup> 등에 의하여 달라진다. 특히 이러한 인자중에서 결함의 위치, 즉 결함이 두개 이상인 경우 결함과 결함의 중심간의 거리에 따라서 응력장의 특성<sup>3,4)</sup>이 달라진다. Ling<sup>4)</sup>은 판재에 두개의 크기가 같은 관통원공이 있는 경우  $L/r$ 이 약 3.5 이상이면 응력장의 중첩의 영향이 사라진다고 하였고, 齊藤 등<sup>5)</sup>은 반무한 탄성체표면에 피트상의 결함이 존재할때, 단축하중이 작

\* 정회원, 고려대학교 기계공학과

\*\* 고려대학교 대학원 기계공학과

용하는 문제를 해석한 결과 응력장은 약  $3r$  까지라고 하였다. 따라서, 응력장의 중첩이 발생하는  $L/r=2$ 인 경우와, 발생하지 않는  $L/r=4$ 인 경우로 시험편을 제작하여 일정응력상태에서 피로크랙전파거동을 관찰하는 것은 중요하리라 생각되며, 2단응력변화로 인한 피로크랙전파거동을 관찰하기에 앞서 실험하였다.

한편, 기계나 구조물은 사용환경 및 운전조건에 따라 하중이 변하는 경우가 대부분이며, 변동응력하에서의 피로에 관한 연구는 실제응력하의 피로를 연구하는데 현실적으로 매우 중요하리라 생각된다. 변동응력이 크랙전파거동에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 행하여 졌으며<sup>6-8)</sup>, Ward-Close 등<sup>9)</sup>은 크랙이 있는 티타늄합금에 100% 단일과하중이 작용할 때 크랙지연현상이 발생하며, 그것은 크랙선단에서의 소성영역의 크기에 기인한다고 하였다. 小寺沢 등<sup>10)</sup>은 알루미늄합금의 스트라이에이션간격의 측정에 의해 응력변동이 균열전파속도에 미치는 영향을 조사하였으며, COD 및 균열선단부의 잔류응력이 크랙전파거동에 영향을 미친다고 하였다. 또한 송등<sup>11)</sup>은 원공결합이 있는 환봉재에 2단응력을 작용한 결과 고-저불력응력이 가해진 경우 크랙전파의 가속현상이 발생하며 그것은 피로크랙선단부의 피해범위와 관련이 있다고 하였다. 이상의 연구를 종합하여 보면 변동응력이 작용하기 전과 작용한 후의 크랙선단에서 소성영역 및 COD의 변화가 중요한 역할을 한다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 변동응력에 대한 기초연구로서 2단응력을 택하여 응력변화에 대한 피로크랙전파거동을 관찰하였다. 또한, 두 종류의 시험편에 대하여 2단응력이 작용하는 시기는 크랙이 합체되기 전단계, 표면크랙 지연현상이 발생하는 단계, 표면크랙 지연현상이 끝난 단계로 구분하였다. 실제의 경우에 좀더 접근시키기 위하여 응력이 변화하는 시기가 크랙전파거동과 어떠한 관계가 있으며, 응력의 변화로 인한 공통적인 영향은 무엇인가를 연구 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 시험편은 SM22C 환봉으로  $910^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간 어닐링처리하였으며, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다.  $d=h=0.3\text{mm}$ 인 미소원공결합 두개를 Fig.1(b)와 같이  $L/r=2$ 와  $L/r=4$ 인 경우로 나누어 원주방향으로 드릴가공하였다. 본 연구 중의 크랙길이  $c$ 는 Fig.2와 같이 두개의 원공 결함에서 성장하는 크랙길이의 합의 반으로 하였다. 2단응력모델은 S-N 곡선과 인장시험을 기초로 하여, 재료의 항복응력 이하에서 두개를 선정하였다.

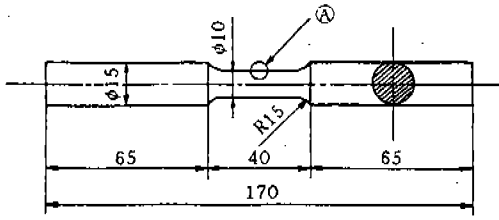
Fig.3은 본 연구에서 실시한 2단응력의 모델이며, 고응력은  $\sigma_H=294.30\text{MPa}$ , 저응력은  $\sigma_L=215.82\text{MPa}$ 로 하였으며, 먼저 작용한 응력을 1차 응력, 나중에 작용한 응력을 2차 응력이라 칭하였다. 이때의 피로한도는 Fig.4와 같이  $L/r=2$ 와  $L/r=4$ 의 경우 모두  $\sigma=147.15\text{MPa}$ 로 동일하였다. Fig.3(a)와 같이 저응력에서 고응력으로 변하는 경우를 저-고 불력응력 또는 과대응력이 작용한 경우라 칭하였으며, Fig.3(b)와 같이 고응력에서 저응력으로 변한 경우를 고-저불력응력 또는 과소응력이 작용한 경우라 칭하였다. 2단응력이 작용하는 시기는 결함사이에서 발생한 크랙이 합체되기 전단계, 표면크랙 지연현상이 발생하는 단계, 표면크랙 지연현상이 완전히 끝난 단계로 구분하였다.

Table 1 Chemical composition of the testing material

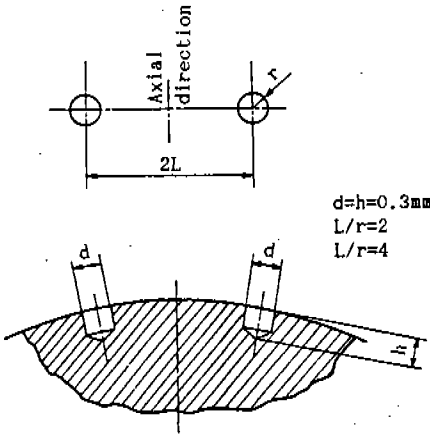
Material	Composition(Wt %)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr, Ni, Mo, Cu
SM22C (annealing)	0.21	0.15	0.69	0.021	0.031	Trivial

Table 2 Mechanical properties of the testing material

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Mean Hardness (mHv)
SM22C (annealing)	445.374	318.825	38.2	59.2	163



(a) Dimension of fatigue specimen



(b) Geometry of two micro-hole flaws (detail drawing of A)

Fig.1 Geometries of fatigue specimen and two micro-hole flaws

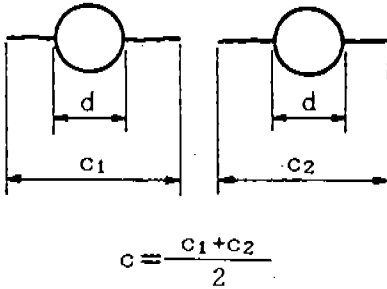
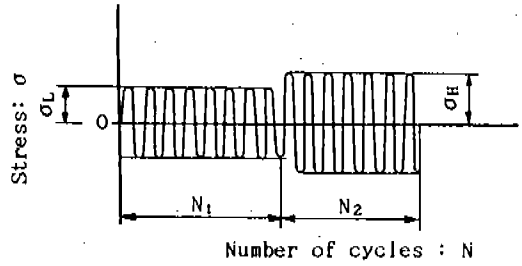


Fig.2 Crack length  $c$

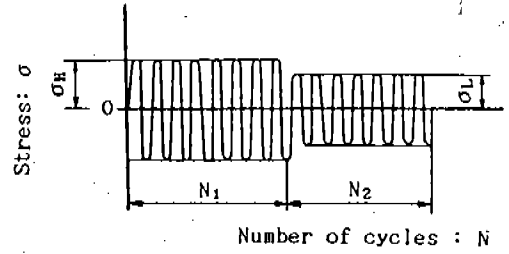
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 일정응력하에서 피로크랙전파거동

Fig. 5는  $L/r=2$ 일때 크랙길이  $c$ 와 응력반복수  $N$ 과의 관계를 나타내며, Fig. 6, 7, 8은 크랙전파속도  $dc/dN$ 과 크랙길이  $c$ 와의 관계를 나타내는 그림이다. Fig.9와 Fig.10, 11,



(a) Model of low-high block stress



(b) Model of high-low block stress

Fig.3 Models of two-step block stress ( $\sigma_H=294.30\text{MPa}$ ,  $\sigma_L=215.82\text{MPa}$ )

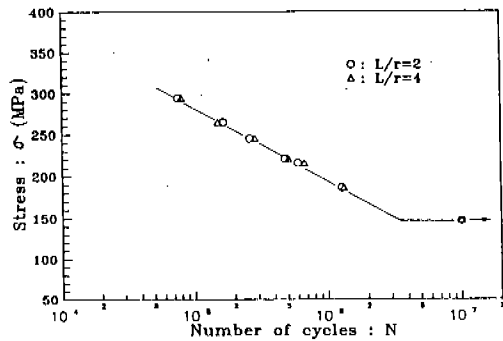


Fig.4 S-N curves of  $L/r=2$  and  $L/r=4$

12는  $L/r=4$ 일때  $c-N$ 곡선과  $dc/dN-c$ 곡선으로  $\sigma=294.30\text{MPa}$ 일때  $\Delta$ 로 표시하고,  $\sigma=215.82\text{MPa}$ 일때  $\circ$ 로 표시했다.

Photo 1은  $\sigma=294.30\text{MPa}$ 일때 파단수명  $N_f$ 의 약 3%인  $N=0.23 \times 10^4$  cycle에서  $L/r=2$ 와  $L/r=4$ 를 사진촬영한 것으로,  $L/r=2$ 인 경우는 슬립밴드 및 미소 크랙이 결합 사이

에서 발생한 반면,  $L/r=4$ 인 경우는 미세한 슬립만이 보일 뿐이다. 이것으로부터  $L/r=2$ 가  $L/r=4$ 보다 크랙발생이 빠르다는 것을 알 수 있으나, 두 경우  $N_f$ 는 약  $7.3 \times 10^4$  cycle 이다.

Murakami 등<sup>9)</sup>은 Fig.13에 나타낸 그림을 토대로 다음과 같이 보고하고 있다. 즉, 두 크랙의 중심간의 거리  $2L$ 이  $c_1+2c_2$  ( $c_1 > c_2$ )보다 작을 때 점  $A_1$ 과  $B_2$ 점이 가까워짐에 따라 그 점에서  $K$ 값은 계속 증가하다가 합체되는 순간부터 감소한다고 하였다.

따라서 본 연구도 이와 같은 관점에서 해석하면,  $L/r=2$ 인 경우 상호효과(interaction effect)가 크랙발생 초기단계에 존재하며, Fig.6과 같이 크랙이 합체되기 직전인  $c=0.5$  mm에서 크랙전파속도는 매우 크다. 또 이것이 합체된 후 부터 표면크랙의 성장은 거의 일어나지 않고 내부크랙의 급격한 성장이 발생하며, 내부크랙이 성장하는 동안  $A_2$ 와  $B_1$  점에서 크랙성장은 거의 발생하지 않는다. (Fig.13 참조)

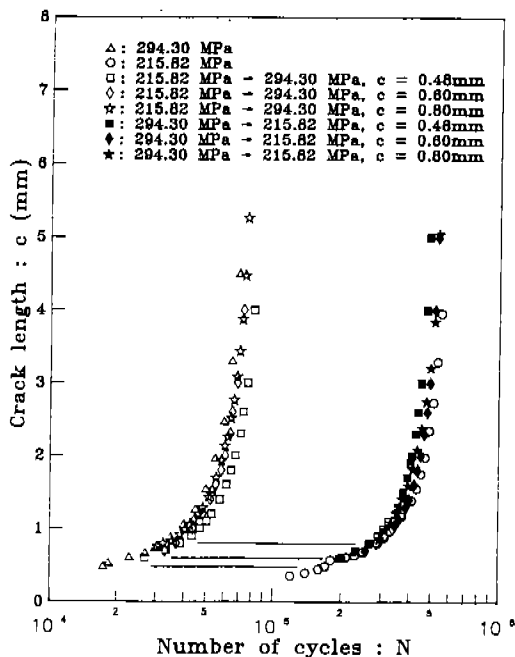


Fig.5 c-N curves for constant stress and two-step block stress ( $L/r=2$ )

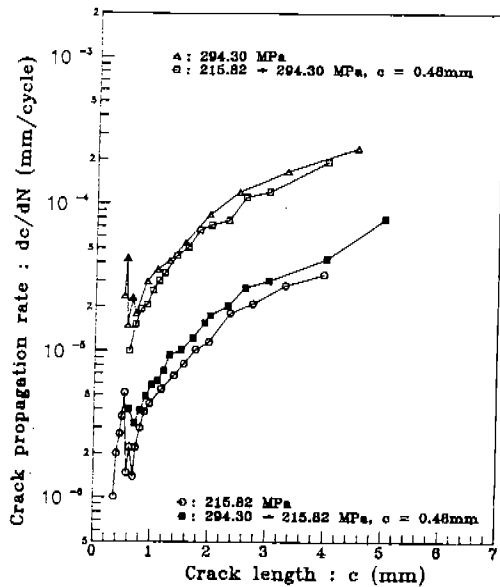


Fig.6  $dc/dN-c$  curves for constant stress and two-step block stress at  $c=0.48$  mm ( $L/r=2$ )

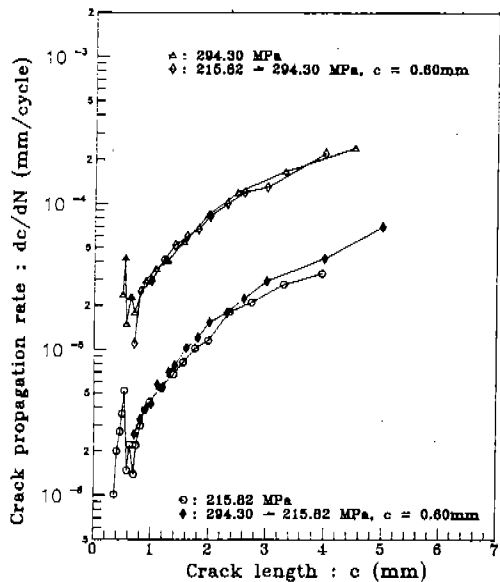


Fig.7  $dc/dN-c$  curves for constant stress and two-step block stress at  $c=0.60$  mm ( $L/r=2$ )

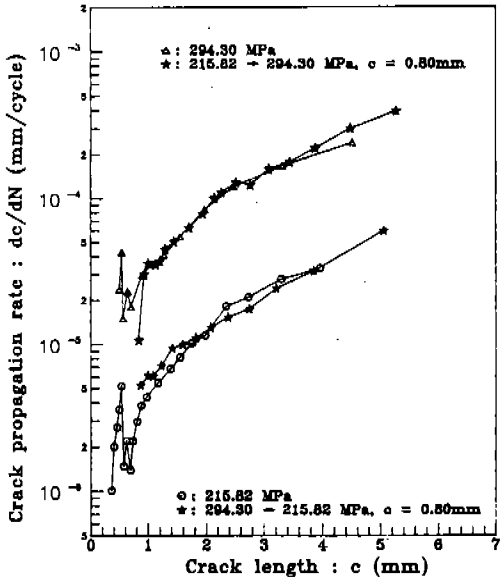


Fig. 8  $dc/dN$ - $c$  curves for constant stress and two-step block stress at  $c=0.80$ mm ( $L/r=2$ )

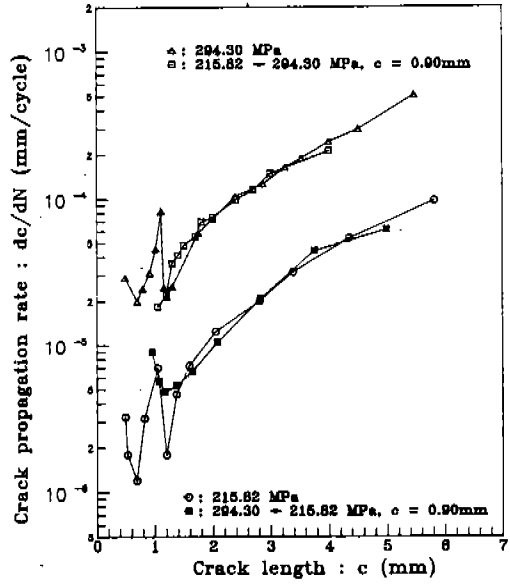


Fig. 10  $dc/dN$ - $c$  curves for constant stress and two-step block stress at  $c=0.90$ mm ( $L/r=4$ )

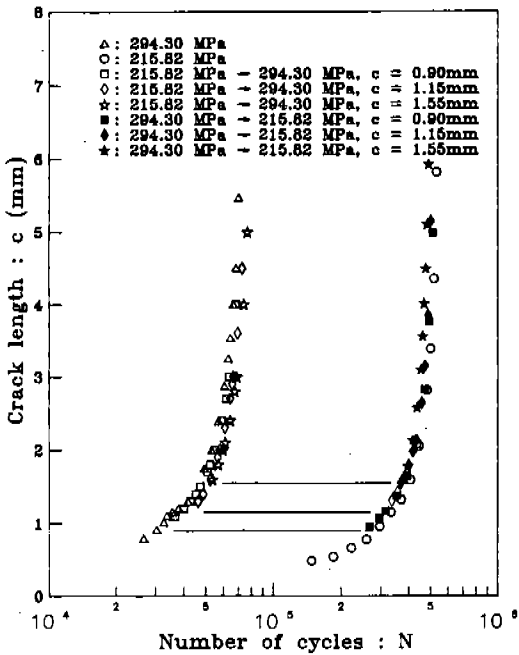


Fig. 9  $c$ - $N$  curves for constant stress and two-step block stress ( $L/r=4$ )

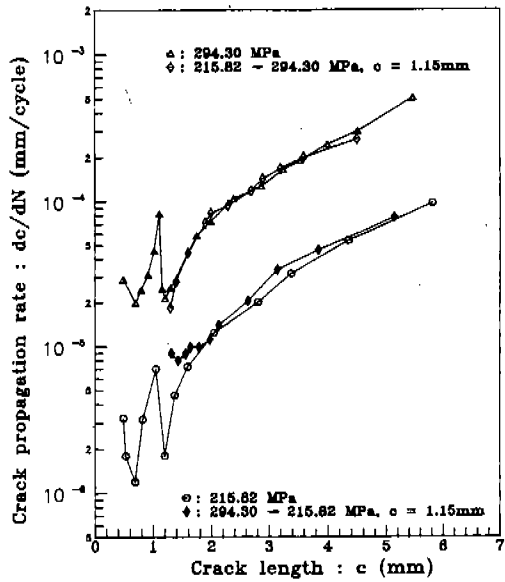


Fig. 11  $dc/dN$ - $c$  curves for constant stress and two-step block stress at  $c=1.15$ mm ( $L/r=4$ )

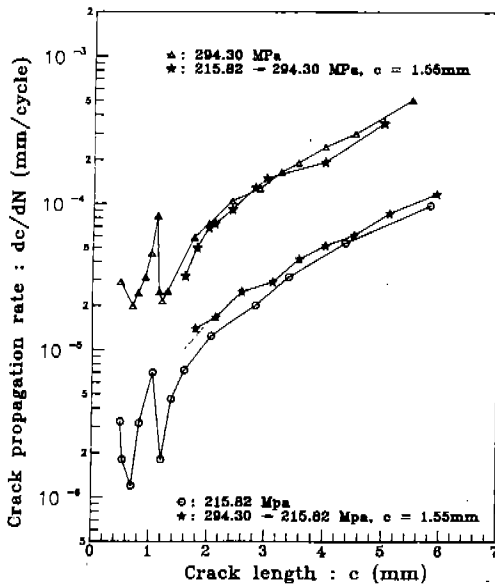


Fig. 12  $dc/dN$ - $c$  curves for constant stress and two-step block stress at  $c=1.55$  mm ( $L/r=4$ )

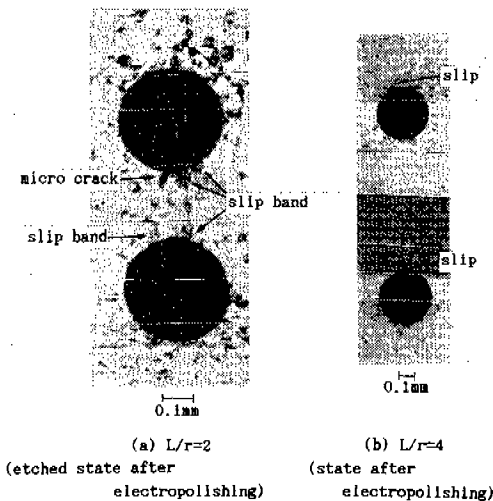


Photo 1 Shape of slip, slip band and micro crack around micro-hole flaws at  $\sigma = 294.30$  MPa and  $N=0.23 \times 10^4$  cycles ( $N/N_f=3\%$ )

이것은  $A_2$ 와  $B_1$ 점의  $K$ 값 보다 합쳐된 곳에서의  $K$ 값이 큼을 의미한다.  $L/r=4$ 인 경우도 동일한 현상이 발생하며, Fig. 10과 같이 크랙이 합쳐되기 직전인  $c=1.05$  mm에서 크랙전파속도는 매우 크게 나타난다.  $L/r=2$ 가

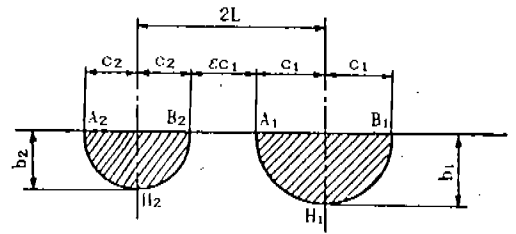


Fig. 13 Interaction between two semi-circular cracks with different sizes<sup>9)</sup>

$L/r=4$ 보다 슬립밴드 및 미소 크랙의 발생은 빠르고 크랙 전파 초기 단계인  $c=0.5$  mm에서 크랙 전파속도가 빠르지만,  $L/r=4$ 인 경우도 크랙이 합쳐되기 직전인  $c=1.05$  mm에서  $K$ 값의 증가로 크랙 전파속도가 빨라지기 때문에 파단수명  $N_f$ 가 비슷한 것으로 생각된다.

### 3.2 과대·과소 응력하에서 피로크랙전파거동

Fig. 5와 Fig. 9는  $L/r=2$ 와  $L/r=4$ 에 2 단응력을 작용했을 때  $c$ - $N$ 곡선을 나타낸 것이며, 2 차응력 즉 과대·과소 응력이 작용하는 시기를 다음과 같이 결정하였다.

두개의 결함 사이에서 발생한 크랙이 간섭 현상의 영향권내에 있고 지연현상이 발생하기 전 단계로서, 그때 크랙길이는  $L/r=2$ 인 경우  $c=0.48$  mm이고,  $L/r=4$ 인 경우  $c=0.90$  mm이다. 지연현상이 발생하는 초기 단계로서, 크랙길이는  $L/r=2$ 인 경우  $c=0.60$  mm이고,  $L/r=4$ 인 경우  $c=1.15$  mm이다. 지연현상이 끝난 단계로서, 크랙길이는  $L/r=2$ 인 경우  $c=0.80$  mm이고,  $L/r=4$ 인 경우  $c=1.55$  mm이다.

Fig. 14는  $L/r=4$ 인 시험편에  $\sigma = 294.30$  MPa에서 원하는 길이 만큼 크랙을 진전시킨 후,  $500^\circ\text{C}$ 에서 1시간 동안 산화착색하여 관찰한 단면을 도식적으로 나타낸 것이다. A는 결함 사이에서 발생한 크랙이 합쳐되기 전 단계이고, D는 내부크랙이 완전히 합쳐된 후의 상태이다. 크랙의 성장은 크랙이 합쳐된 순간부터 내부로 급격히 증가하는 반면, 표면에서는 급격히 감소하는데, 이것을 표면크랙 지연 현상 또는 지연현상이라 하였다. Photo 2는 A와 C 점에서 산화착색한 내부크랙을 사진촬영

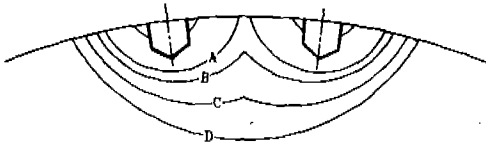
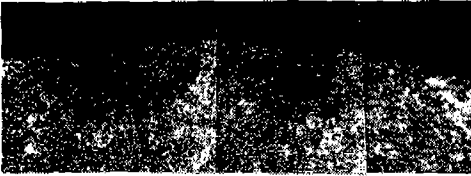
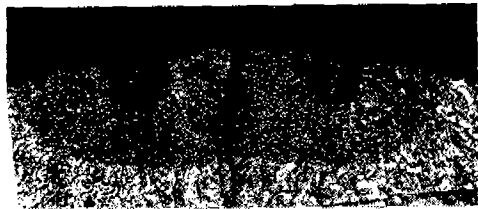


Fig. 14 Schematic diagram of twin semi-elliptical cracks in rotary bending ( $L/r=4$ )



(a) Crack shape at point A



(b) Crack shape at point C

Photo 2 Shapes of crack and flaw by heat tinting ( $L/r=4$ )

영한 것이다.

본 절의 연구 목적은  $\sigma_1$ 에서  $\sigma_2$ 로 2단응력이 작용하는 경우와,  $\sigma_1=\sigma_2$ 로 일정응력인 경우를 비교하여 2단응력이 크랙전파거동에 미치는 영향을 관찰하는 것이다. 이같은 관찰을 하기 위하여 Fig. 5에 나타난 결과는 다음과 같은 방법으로 실험을 하였다.  $L/r=2$ 인 경우 크랙길이  $c=0.48\text{mm}$ 에서  $\sigma_1=215.82 \rightarrow \sigma_2=294.30\text{MPa}$ 으로 저-고불력응력을 부과하려고 할 때

(1) 시험편 I로  $\sigma=215.82\text{MPa}$ 인 일정응력에 대한  $c-N$ 곡선을 작성한다(Fig. 5에서 ○으로 표시).

(2) 시험편 II로  $\sigma=294.30\text{MPa}$ 인 일정응력에 대한  $c-N$ 곡선을 작성한다(Fig. 5에서 △

으로 표시).

(3) 시험편 III으로  $\sigma=215.82\text{MPa}$ 에서 크랙을  $0.48\text{mm}$  진전시킨 다음, 그때의 회전반복수를  $\sigma=294.30\text{MPa}$ 으로 일정일 때 크랙길이  $c=0.48\text{mm}$ 에 대한 회전반복수로 대치시킨다.

(4) 시험편 III에 작용한  $\sigma_1=215.82\text{MPa}$ 인 응력을 크랙길이  $c=0.48\text{mm}$ 에서  $\sigma_2=294.30\text{MPa}$ 으로 응력을 변화시킨 후,  $c=0.48\text{mm}$  이상에서 실험하여 2단응력에 대한  $c-N$ 곡선을 얻는다(Fig. 5에서 □으로 표시).

(5)  $\sigma=294.30\text{MPa}$ 으로 일정응력을 받는 경우와  $\sigma_1=215.82\text{MPa} \rightarrow \sigma_2=294.30\text{MPa}$ 으로 2단응력을 받는 경우의  $c-N$ 곡선을 크랙길이  $c=0.48\text{mm}$ 이상인 구간에서 서로 비교한다.

Fig. 5와 Fig. 9는 위와 같은 방법으로 실험한 결과를 정리한 것으로 2단응력이 크랙전파거동에 미치는 영향을 관찰하였으며, 그 결과 저-고불력응력이 작용한 경우는 고응력으로 일정한 상태보다 크랙전파가 느려졌고, 고-저불력응력을 받은 경우는 저응력으로 일정한 상태보다 크랙전파가 빨라졌다.

이러한 결과에 영향을 주는 대표적인 인자는 소성영역의 크기<sup>6,8,10</sup> 크랙의 열림과 닫힘<sup>6,7</sup> 등이 있으며, 소성영역의 관점에서 먼저 실험결과를 분석하였다. 표면에서 응력상태는 평면응력상태이므로, 소성역의 크기  $r_p$  ( $\theta$ )는 Von Mises<sup>11</sup>의 식에 의하여

$$r_p(\theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_{ys}^2} \left( 1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right) \quad (1)$$

로 표현한다. 즉  $r_p(\theta)$ 는  $K^2$ 에 비례하는 값이다. 본 실험의 경우 시험편에 작용하는 회전굽힘응력은 Fig. 15와 같다. 결함이 있는 부분에 최대응력이 작용할 때 Fig. 15(b)와 같이 인장응력과 굽힘응력이 작용하게 된다. 이때 인장성분은 굽힘성분보다 매우 크지만 결함에서 발생한 크랙이 커질수록 크랙에 작용하는 응력은 굽힘성분이 점차 증가하게 된다. 따라서 결함을 포함하는 크랙에는 인장성분과 굽힘성분의 응력이 동시에 작용하며 그때  $K$ 는 다음과 같다.<sup>9)</sup>

$$K = \frac{F_b(\sigma_2 - \sigma_1)\sqrt{\pi(b \text{ or } c)}}{F_t\sigma_1\sqrt{\pi(b \text{ or } c)}} \quad (2)$$

여기서  $F_b$ 와  $F_t$ 는 굽힘응력과 인장응력을 받을 때  $A_1, A_2, B_1, B_2, H_1, H_2$  점에서 무차원응력확대계수이다. 식 (2)를 이용하면  $r_p(\theta)$ 는  $[F_b(\sigma_2 - \sigma_1)\sqrt{\pi(b \text{ or } c)} + F_t\sigma_1\sqrt{\pi(b \text{ or } c)}]^2$ 에 비례한다. 결함의 형태 즉, 결함의 크기·모양·갯수·위치와 같은 경우, 표면크랙 길이가 같을 때 크랙면의 형상은 동일할 것이므로,  $r_p(\theta)$ 는 응력의 지승형에 근사적으로 비례하게 된다.

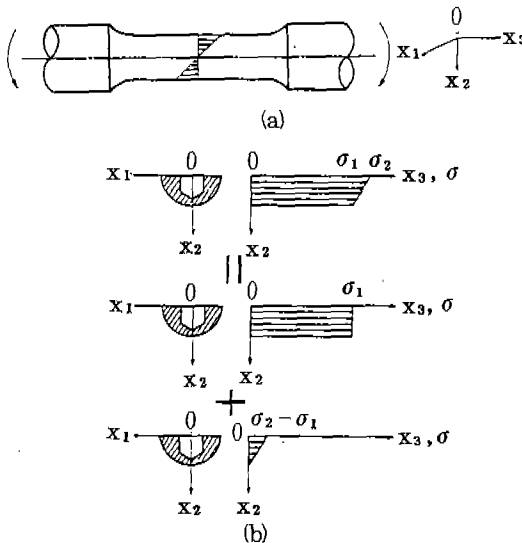


Fig. 15 Tension and bending stress distribution acting on the specimen under rotary bending fatigue test

저-고블럭응력을 작용한 경우 저응력에서 발생한 소성역의 크기는 같은 크랙길이를 갖는 고응력에서 그것보다 작다. 그러므로 고응력에서 발생하는 소성역의 크기만큼 커질 때까지 크랙전파속도는 느려질 것으로 생각된다. 또한 고-저블럭응력을 작용한 경우 고응력에서 발생한 소성역의 크기는 같은 크랙길이를 갖는 저응력에서 그것보다 크므로, 그만큼 크랙전파가 빨라질 것으로 생각된다. 따라서 이러한 현상은 2단응력이 작용한 직후 가장 크게 나타나리라 예상되며, Fig. 6, 7, 8과 Fig. 10, 11, 12로부터 그 현상을 확인할 수 있었다.

Fig. 6, 7, 8과 Fig. 10, 11, 12의  $dc/dN-c$  곡선을 관찰하면 2단응력의 영향은 초기에 가장 심하며 크랙이 진전함에 따라 크랙전파속도는 일정응력상태에서의 그것과 거의 일치하게 된다. 또한, 이러한 현상은 2단응력이 작용하는 시기와 결함의 위치( $L/r=2, L/r=4$ )에 관계없이 비슷한 양상을 보여준다.

#### 4. 결 론

SM 22C 저탄소강재를 어닐링처리한 후,  $d=h=0.3\text{mm}$ 인 미소 원공결함( $L/r=2, L/r=4$ )을 갖는 시험편을 제작하여 회전굽힘피로시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)  $L/r=2$ 인 경우 초크랙 발생은 빨랐으나  $L/r=4$ 인 경우와 파단수명  $N_f$ 가 비슷하며, 피로한도( $\sigma=147.15\text{MPa}$ ) 또한 동일하였다.
- (2) 2단응력 중에서 저-고블럭응력이 작용한 경우, 고응력 일정인 경우보다 크랙이 느리게 전파하였고, 고-저블럭응력을 작용한 경우는 저응력 일정인 경우보다 크랙이 빠르게 전파하였다.
- (3) 2단응력의 영향은 그것이 작용한 직후가 가장 심하며, 작용하는 시기와 결함의 위치에 관계없이 비슷한 양상을 보여준다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 기초연구비 지원과 제(881-0910-019-2)의 연구비 일환으로 연구되었으며, 관계제위에 심심한 사의를 표한다.

#### 참 고 문 헌

1. 村上敬宜·遠藤正浩, 疲労強度に及ぼす微小缺陷の影響の評価法, 日本機械學會論文集(A編), 49卷 438號, pp.127~136, 1983.
2. 宋森弘·吳煥燮, 表面缺陷에서 發生하는 疲労크랙 舉動, 大韓機械學會論文集, 第 9



- 卷 第2號, pp.150~157, 1985.
3. H. Tada, P.C. Paris and G.R. Irwin, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, pp. 20.1-20.2, Del Research Corporation, Hellertown, Pennsylvania, 1973.
  4. Chin-Bing Ling, *Stress on a Plate Containing Two Circular Holes*, *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, pp. 77-83, 1948.
  5. 齊藤憲可, 中原一郎, 半球ピットを有する半無限體の1軸引張り, *日本機械學會論文集*, 33卷 247號, pp.345~350, 1967.
  6. C.M. Ward-Close and R.O. Ritchie, *On the Role of Crack Closure Mechanisms in Influencing Fatigue Crack Growth Following Tensile Overloads in a Titanium Alloy: Near Threshold Versus Higher  $\Delta K$  Behavior*, *ASTM STP 982*, pp. 93-111, 1988.
  7. 北川英夫・小寺沢良一, *破壊力學と材料強度講座 15: フラクトグラフィ*, 培風館, 東京, pp.114~119, 1977.
  8. 宋森弘・元時太, *過大・過小應力下에서의 疲勞三叫發生舉動(I)*, *大韓機械學會論文集*, 第9卷 第3號, pp.301~308, 1985.
  9. Y. Murakami and S. Nemat-Nasser, *Interaction Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws Under Tension and Bending*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, No. 3, pp. 373-386, 1982.
  10. L.N. McCartney, *A Theoretical Explanation of the Delaying Effects of Overloads on Fatigue Crack Propagation*, *Int. Journal of Fracture*, Vol. 14, No. 2, pp. 213-231, 1978.
  11. David Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, pp. 96-101, 1983.