

# 불규칙하게 분포된 미소결함 사이의 응력간섭 및 피로균열 거동에 대한 실험적 연구 ( I )

송삼홍\* · 배준수\*\* · 최병호\*\*  
(1999년 8월 13일 접수)

## An Experimental Study on the Fatigue Behavior and Stress Interaction of Arbitrarily Located Defects (I)

Sam-Hong Song, Jun-Soo Bae and Byoung-Ho Choi

**Key Words:** Fatigue Crack Propagation(피로균열전파), Fatigue Crack Initiation(피로균열발생),  
Stress Concentration Factor(응력집중계수), Fatigue Notch Factor(피로노치계수),  
Stress Interaction Field(응력장간섭), Fatigue Crack Initiation Life(피로균열발생수명)

### Abstract

In this study, fatigue crack behavior between arbitrarily located defects was investigated by experiment. Especially, stress interaction between micro hole defects and fatigue cracking, and fatigue crack initiation life following the variation of location of micro hole defects were considered. In addition, crack initiation position by micro hole stress interaction and the relationship between stress concentration factor and fatigue initiation life are studied in detail.

### 기호설명

$L$  : 미소원공 중심 사이의 거리 ( $mm$ )  
 $\ell (=L/r)$  : 무차원화된 미소원공 사이의 중심거리  
 $r$  : 미소원공의 반지름 ( $mm$ )  
 $\theta$  : 하중축의 수직방향과 두 개의 원공노치 중심을 연결한 선 사이의 각도 ( $^\circ$ )  
 $\phi$  : 원공 둘레에서의 한 점의 위치 ( $^\circ$ )  
 $\sigma_{max}$  : 원공주위에 작용한 최대응력 ( $MPa$ )  
 $\sigma_{nom}$  : 공칭응력 ( $MPa$ )  
 $\sigma_y$  : Y축 방향 응력 ( $MPa$ )  
 $a$  : 피로균열길이 ( $mm$ )

$N$  : 응력반복수 ( $cycles$ )  
 $K_t$  : 응력집중계수  
 $K_f$  : 피로노치계수

### 1. 서론

비금속 개재물이나 결함이 피로균열의 발생원이 되는 경우에는 경도의 대소에 관계없이 이들을 포함한 국부영역은 응력집중원이 된다.<sup>(1~4)</sup> 아울러 자연결함이나 비금속 개재물은 그 크기나 형상에 따라 피로강도의 크기를 좌우할 것이 예상되나 이들의 크기나 형상을 야금학적으로 제어한 시험편을 제작한다는 것은 상당한 시간과 노력이 요구될 뿐만 아니라 실험의 재현성이 없어 자연결함 대신 인공결함을 이용하여 미소결함재의 특성을 연구하여 왔다. 즉, 결함이나 개재물이 피로강도 및 피로거동에 어떻게 기여하는가를 규명하기 위해서는 이들의 형상, 크기, 종류 등이 달라

\* 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : shsong@kucn.korea.ac.kr

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

\*\* 회원, 고려대학교 대학원

도 이들이 갖는 역학적 인자만을 고려하면, 인공 미소결합을 갖는 결합체의 피로 파괴거동은 결합의 기하학적인 형상을 인자로 취급함으로써 피로 파괴거동에 대한 결합의 영향을 규명할 수 있다.

한편 상기의 결합이나 개재물들이 재료내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고 분포되어 있는 상태도 인접하거나 원접하는 등 다양하다. 이와 같이 다양하게 분포된 결합이나 균열들 사이의 응력이나 균열전파거동<sup>(5)</sup>은 이들이 서로 인접하여 있을 때와는 다르게 응력이 분포되고 피로균열전파거동도 다르게 된다. 이에 관련된 연구로서는 결합이나 개재물 사이의 응력장의 간섭에 관한 것, 균열사이의 응력확대계수를 구하여 균열의 간섭영향을 구한 것,<sup>(6)</sup> Notch나 결합에서 발생하여 전파하는 균열의 전파속도를 실험에 의하여 간섭영향을 구한 것, 그밖에 균열들의 간섭과 합체에 의한 균열전파 수명의 감소를 평가한 것<sup>(7)</sup> 등이 있다. 이들 연구결과를 종합하면 결합이나 균열이 인접하여 있을 경우 이들 사이의 응력장간섭에 의하여 특히 응력장이 형성되어 응력확대계수가 급격하게 증가함으로써 피로균열은 서로 빠른 속도로 합체된다는 것이 예상된다. 이와 같은 응력장의 간섭에 따른 초기균열의 발생 및 전파거동을 파악하기 위해서는 결합이나 개재물 주위의 응력집중이나 이들의 분포 및 간섭형태를 규명하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 불규칙하게 분포되어 있는 미소결합들 사이에 발생, 전파하는 피로균열 거동을 고찰하려고 한다. 특히 미소결합 사이의 응력간섭과 피로균열 관계, 미소결합의 위치변화에 따른 피로균열 발생수명 거동, 미소결합의 간섭영향과 피로균열 발생위치 변화, 응력집중계수와 피로수명, 및 응력변화와 피로균열거동 등에 대하여 상세하게 고찰하려고 한다.

## 2. 시험편 준비 및 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 ASTM에 규정된 Al5086이다. 이 재료의 기계적 성질 및 화학적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다. 작용하중은 면외압하중이며 시험편은 시험편 중앙에 미소 원공 노치를 가공하여 사용하였다. 두 미소 원공간의 위치는 Fig. 2와 같이 하중축의 수직 방향과 두 개

의 원공노치 중심을 연결한 선과의 각도가  $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 가 되도록 하였다. Fig. 2에서의  $\phi$ 는 원공둘레에서의 한 점의 위치이다.

본 실험에서의 미소 원공결합들은 임의의 각도와 거리를 갖도록 다양하게 배열하였다. 결합의 형상은 실험의 재현성과 용이한 해석을 위해서 단순화시켜 사용하였으며 시험편 표면에 미소원공을 가공하여 사용하였다. 또한 표면에 존재하는 미소결합을 관심의 대상으로 하였기 때문에, 관통노치를 사용하지 않고 미소원공 지름과 동일한 깊이를 갖는 미소원공 결합 노치를 사용하였다. 또한 결합의 분포 위치는 결합 중심간의 거리와 각도로 표시하였다. 사용한 시험기는 굽힘 및 피로시험기 Shimazu의 TB-10이다.

Table 1 Mechanical properties of Al5086

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's ratio
260	190	22	62.4	0.32

Table 2 Chemical composition of Al5086 (wt%)

Al	Mn	Mg	Cr
95.4	0.1	4.0	0.15

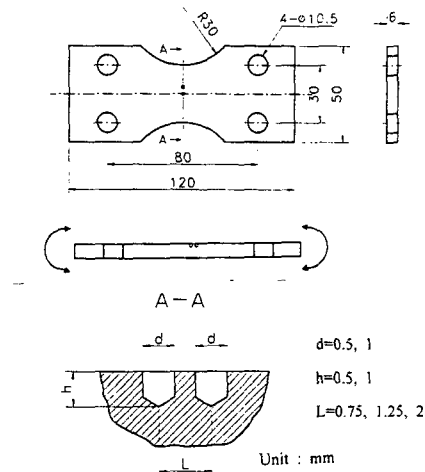


Fig. 1 Geometries of bending test specimen

이 시험기의 최대 모멘트 진폭은 98N·m이며, 분당 회전수는 2000rpm이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미소원공결합의 위치변화에 따른 피로균열 발생수명 변화거동

피로균열 발생수명의 변화를 고찰하기 위하여, 미소원공중심 사이의 거리는  $L=0.75\text{mm}$  ( $l=L/r=3$ )로 고정시키고 두 개의 미소원공결합 중심을 연결한 선과 x축 사이의 각도는  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 로 변화시켰다. Murakami<sup>(1)</sup>는 Fig. 3과 같이 결합이 두 개 있을 때 상호 간섭을 일으키는 거리는  $2L \leq 2a_1 + 2a_2$ 이라 하였다. 본 연구에서는  $a_1=0.25\text{mm}$ ,  $a_2=0.25\text{mm}$ 이므로  $2L$ 은  $0.75\text{mm}$ 로 Murakami<sup>(5)</sup>의 연구 결과에 의하면 상

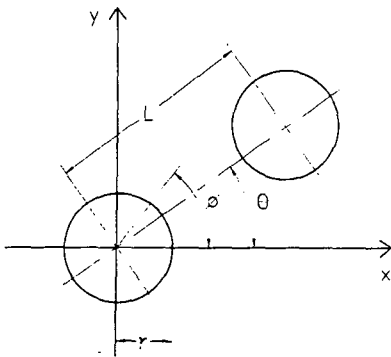


Fig. 2 Relative position of two micro hole defects

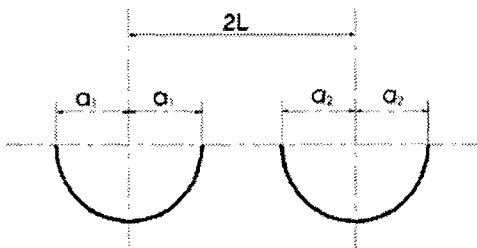


Fig. 3 Two interacting flaws (the distance between two circular defects( $2L$ ) should be less than  $2a_1+a_2$  to observe stress interaction, by Murakami)

호간섭을 일으킬 수 있는 거리이다. 원공의 지름은  $d=0.5\text{mm}$ 이며, 깊이는  $h=0.5\text{mm}$ 이다. 작용응력의 응력비는  $R=-1$ , 최대작용응력은  $\sigma_{\text{max}}=90\text{MPa}$ 이다. 최대작용응력은 미소원공 노치가 한 개 있을 때 피로균열의 성장 거동을 충분히 관찰할 수 있는 응력으로 결정하였다. 미소원공 노치가 한 개 있을 때  $\sigma_{\text{max}}=90\text{MPa}$ 에서의 피로균열 발생수명은 약  $N_f=5 \times 10^5 \text{cycles}$ 이다. 시편의 파단 수명은 약  $N_f=1.2 \times 10^6 \text{cycles}$ 이다.

미소원공결합 주위에는 여러 개의 응력집중부가 존재하기 때문에 피로균열은 여러 부위에서 발생한다. 피로균열 발생수명은 여러 개의 균열발생결합 중 가장 발생수명이 작은 부위에서의 것을 그 수명으로 하였다. 균열발생수명을 검토할 때, 균열발생길이에 대해 정의하는 것은 어려운 문제이다. 예로서 노치 주위에서 발생하는 소성역 때문에, 피로균열발생수명은 노치 반지름의 1/10로 정의해야 한다는 연구<sup>(6)</sup>가 있는 반면, Braglia<sup>(9)</sup> 등은 피로균열발생 길이를  $a=0.25 \text{mm}$ 로 정의하는 등 일정한 기준을 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 편리상 균열의 길이가  $a=0.1 \text{mm}$ 일 때의 반복수를 피로균열 발생수명으로 정의하였다.

미소원공결합의 상호위치를 변화시켜 얻은 각 응력집중부에서의 피로균열발생수명은 Table 3과 같다. Fig. 4는 균열발생수명과 미소원공의 위치변화 각도  $\theta$ 와의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 피로균열 발생수명은  $\theta=0^\circ$ 에서 가장 작으

Table 3 Crack initiation cycle under bending applied loading

Kind of Holes	Factor	Cycle	Cycle
			Cycle at one hole
One hole		$5.4 \times 10^5$	1.00
Two holes, $\theta$	$0^\circ$	$3 \times 10^4$	0.056
	$30^\circ$	$1 \times 10^5$	0.19
	$45^\circ$	$1.5 \times 10^5$	0.28
	$60^\circ$	$1.2 \times 10^5$	0.22
	$90^\circ$	$7 \times 10^5$	1.3

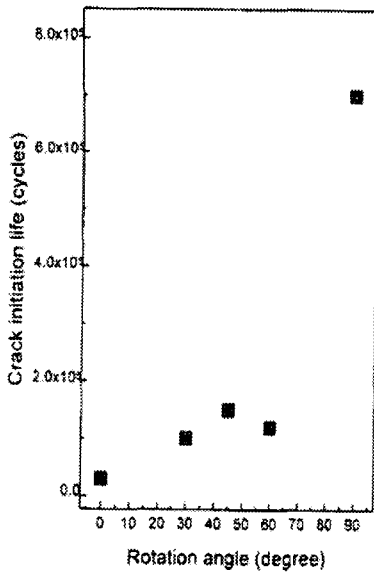


Fig. 4 Experimental crack initiation data under bending ( $l=3$ ,  $d=0.5\text{mm}$ ,  $h=0.5\text{mm}$ ,  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ )

며, 그 다음으로  $\theta=30^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  의 순서이다. 각각의 피로균열 발생수명을 비교하기 위하여 미소원공결합이 1개 있는 시편의 피로균열 발생수명을 기준으로 한 상대값, 예를 들면 각 경우의 피로균열 발생수명을 미소원공결합이 1개일 때의 피로균열 발생수명의 값으로 나눈 값을 Table 3에 함께 나타내었다.  $\theta=0^\circ$  일 때의 피로균열 발생수명은 원공결합이 1개 있는 시편의 피로균열 발생수명에 비하여 0.056배의 값을 갖는다.  $\theta=90^\circ$  일 때, 피로균열은  $N=7 \times 10^5$  사이클에서 가장 늦게 발생하였는데, 이 값은 원공결합이 1개 있을 때보다 1.3배 크다. 또  $\theta=90^\circ$  일 때의 피로균열 발생수명 값은  $\theta=0^\circ$  일 때의 약 23배로, 결합의 상호위치에 따라 피로균열 발생수명의 변화가 매우 크게 나타났다.

### 3.2 미소원공결합의 간섭영향에 의한 피로균열 발생위치 변화거동

두 개의 미소원공결합이 인접하여 있을 때, 한 개의 미소원공결합에는 주로 두 곳의 응력집중부가 발생한다. 미소원공 사이의 간섭으로 미소원공 사이에 응력집중부가 형성되고, 미소원공이 인접한 부분의 반대쪽인 바깥 쪽 부분에 또 다른

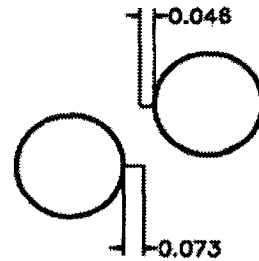
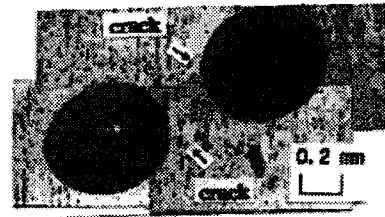


Fig. 5 Crack initiation position around hole when  $\theta=30^\circ$  (Cracks between two holes initiate sooner, when  $N=1.2 \times 10^5$  cycles)

응력집중부가 존재한다. 따라서 피로균열은 미소원공 결합간 사이와 바깥 부분의 두 곳에서 발생한다. 두 개의 미소원공 주위에서 관찰되는 피로균열을 분류하면 (1) 미소원공결합간 사이에서 최초로 발생하는 경우, (2) 바깥 부분에서 최초로 발생하는 경우, (3) 미소원공결합 안쪽사이와 바깥 부분에서 거의 동시에 발생하는 경우 등이 있는데 어느 것이 우선권을 갖는가에 대해서는 좀 더 구체적인 실험연구가 필요하다고 생각되지만 이는 응력의 크기와 분포등에 따라서 결정된다.

#### 3.2.1 미소원공결합 사이에서 피로균열 발생이 시작되는 경우

두 개의 미소원공결합간 거리가 가깝다고 두 개가 놓여진 각도가  $\theta=0^\circ$  와  $30^\circ$  일 때 피로균열은 미소원공결합 사이에서 먼저 발생한다.  $\theta=0^\circ$  인 경우는 두 개의 미소원공결합 사이에서 발생한 피로균열 발생과 거의 동시에 합쳐된다.  $\theta=30^\circ$  인 경우에도 원공 사이에 형성된 응력집중부에 피로균열이 먼저 발생하고 약  $N=5 \times 10^4$  사이클 후에 바깥쪽에 피로균열이 발생한다. Fig. 5는  $\theta=30^\circ$  인 경우에 약  $N=1 \times 10^4$  사이클에서 촬영한

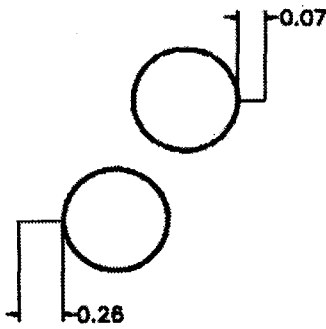
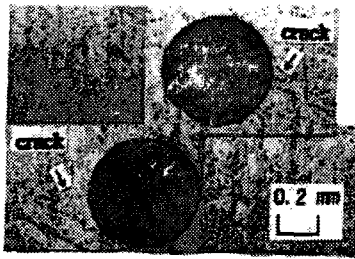


Fig. 6 Crack initiation position around hole when  $\theta=60^\circ$  (Cracks out of holes initiate sooner, when  $N=1.2 \times 10^5$  cycles)

사진이다. 미소원공의 바깥쪽에는 균열이 아직 발생하지 않았으며, 미소원공 사이에서 두 개의 균열이 거의 동시에 발생하였다.

3.2.2 미소원공결함 바깥에서 피로균열이 시작되는 경우

두 개의 미소원공 사이의 거리가 짧고 그 두 개가 놓여진 각도가  $\theta=60^\circ$  일 때는 피로균열은 미소원공의 바깥쪽에서 최초로 발생한다. Fig. 6은 피로균열이 발생한 모습을 촬영한 것이다. 이 사진은  $\theta=60^\circ$ ,  $N=1.2 \times 10^5$  사이클에서의 피로균열의 형태를 나타낸다. 미소원공의 안쪽사이에는 균열이 아직 발생하지 않은 상태를 관찰 할 수 있다. 좌측 원공에서 발생한 균열의 길이는  $a=0.26\text{mm}$ , 우측 원공에서 발생한 피로균열의 길이는  $a=0.07\text{mm}$ 이다.

3.2.3 미소원공결함 바깥 부분에서 거의 동시에 피로균열이 시작되는 경우

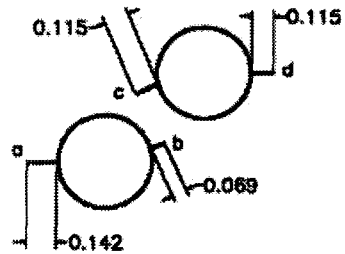
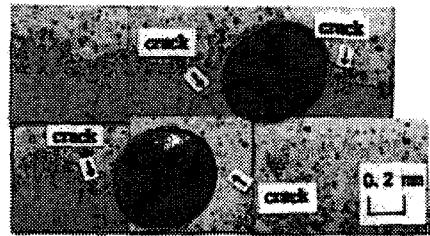


Fig. 7 Crack initiation position around hole when  $\theta=45^\circ$  (Cracks initiate almost simultaneously at 4 positions, when  $N=1.5 \times 10^5$  cycles)

두 개의 미소원공 사이의 거리가 짧고 그 두 개가 놓여진 각도가  $\theta=45^\circ$ ,  $90^\circ$  인 경우에는 피로균열은 미소원공결함 안쪽사이와 바깥 부분에서 거의 동시에 발생한다.  $\theta=90^\circ$  인 경우에는 미소원공의 양쪽이 같은 응력 상태에 있기 때문에 피로균열은 가공표면 상태 등에 따라서, 선택된 장소에서 먼저 발생한다고 생각된다.  $\theta=45^\circ$  일 때는 약  $N=1.5 \times 10^5$  사이클에서 피로균열은 발생하였다(Fig. 7). 이 경우는 모든 응력 집중부에서 균열은 거의 동시에 발생한 경우이다. 이 결과는 4곳의 응력 집중부의 조건이 유사함을 나타낸다고 생각된다.

3.3 응력집중계수와 피로균열발생수명과의 관계

Fig. 8은 미소원공 사이의 각도  $\theta=45^\circ$  일 때 응력집중부에서 발생한 피로균열의 모습을 나타낸다. 응력과 피로균열 발생수명과의 관계를 살펴보기 위하여 응력집중계수를 다음 식 (1)과 같이 정의하고 실험값과 비교하였다.

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (1)$$

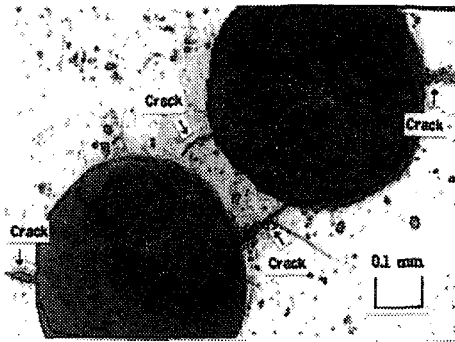
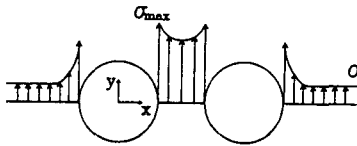


Fig. 8 The crack initiation at stress concentrations between two micro hole defects( $\theta=45^\circ$ )



$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

$$\sigma_{nom} = P/A$$

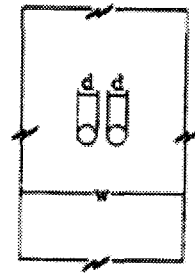
Fig. 9 Stress concentration factor,  $K_t$

여기서,  $\sigma_{max}$ 는 원공 주위에서 발생한 최대응력이고,  $\sigma_{nom}$ 는 공칭응력이다. Fig. 9는 응력집중계수의 정의를 표시한 것으로  $\theta=0^\circ$ 일 때의 예를 나타낸다. Fig. 10은 공칭응력을 정의한 것이다.  $\theta=0^\circ$ 일 때는 두 개의 원공 지름을 고려하여 면적(A)을 계산하였으며, 나머지 경우는 한 개의 원공 지름을 뺀 값으로 면적을 계산하였다.

일반적으로 응력집중계수의 대소는 피로수명의 대소와 일치하지 않는다. 재료의 강도와 피로수명을 검토할 때 응력집중계수와 더불어 피로노치계수가 널리 사용된다. 피로노치계수는 다음 식(2)와 같이 나타낸다.

$$K_f = \frac{\sigma_e^{(unnotched)}}{\sigma_e^{(no tched)}} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_e$ 는 피로강도이다. 응력집중계수는 기하학적 모양과 하중의 형식에 영향을 받고, 노치계수는 이와 더불어 재료에도 영향을 받는다. 노치계수를 이용하여 일반적인 기계가 가질 수 있

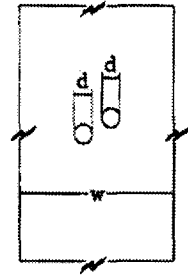


$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

$$\sigma_{max} = P/A$$

$$A = (w-2d)t$$

(a) when  $\theta=0^\circ$



$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

$$\sigma_{nom} = P/A$$

$$A = (w-d)t$$

(b) Except  $\theta=0^\circ$

Fig. 10 Definition of stress concentration factor on this study

는 복잡한 문제를 해결하기에는 다소 무리가 있다. 피로파괴현상을 연구하는데 있어 가장 어려운 일 가운데 하나가 단축 피로 시험에서 얻은 결과를 혼합하중상태에 적용하는 것이기 때문이다.

재료의 수명은 응력집중부의 응력의 크기나 응력분포에 영향을 받으므로<sup>(10)</sup> 피로균열 발생수명과 응력집중계수와와의 관계를 살펴보았다. 피로균열 발생수명은 Table 3을 사용하였으며, 응력집중계수는 탄성 유한요소해석을 통하여 구하였다. Fig. 11은 미소원공사이의 각도를 변화시켰을 때 각각의 응력집중계수를 나타낸다. 응력집중계수는  $\theta=30^\circ$ 일 때  $K_t=3.77$ 의 최대값을 갖고 이후 계속 감소하다가  $\theta=90^\circ$ 에서  $K_t=2.63$ 으로 최소값을 갖는다. 이는 Peterson<sup>(11)</sup>의 제시한 결과선도와 일치한다. 응력집중계수와 피로균열 발생수명과의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 응력집중계수와 균열수명과의 관계는 일정하지 않았다. 즉 응력집중계수가 큰 곳에서 균열이 반드시 빨리 발생하지 않았다.  $\theta=30^\circ$ 에서 응력집중계수는 가장 크지만  $\theta=0^\circ$ 에

서의 균열은 가장 빨리 발생하였다. 그리고  $\theta = 45^\circ$  일 경우보다  $\theta = 60^\circ$  일 때는 응력집중계수가 작음에도 불구하고 균열은 더 빨리 발생하였다. 이 점에 대하여는 구체적인 검토가 요망된다. 이 점은 단순한 응력 집중이 원인이 아니고 다른 역학적 인자, 예를 들어 국부변형률이나 조직상의 문제 등이 피로균열발생의 주된 원인이기 때문이라고 생각된다.

3.4 미소원공결함 사이의 거리변화에 따른

응력의 변화가 피로균열 발생수명에 미치는 영향

전 절에서는 미소원공간 거리가  $\ell = 3$ 일 때의 피로균열 발생수명과 응력집중계수와와의 관계를 살펴보았다. 미소원공간의 거리가 멀어지면 간섭 영향이 작아져 응력집중계수가 감소할 것이다.

본 절에서는 미소원공 사이의 거리 변화에 따른 피로균열 발생수명의 변화를 살펴보았다. 먼저, 거리변화에 따른 응력간섭의 변화를 살펴보기 위하여  $\ell = 3$ 일 때의 응력집중계수를 구하였다. Fig. 13은  $\ell = 5$ 일 때의 응력집중계수이다.  $\ell = 5$ 일 때의 응력집중계수는  $\ell = 3$ 일 때의(Fig. 11 참조) 그것과 경향은 유사하지만 그 크기의 차이는 훨씬 작다. 이는 미소원공 사이의 거리가 멀어지면서 미소원공간의 간섭 영향이 작아지기 때문이다

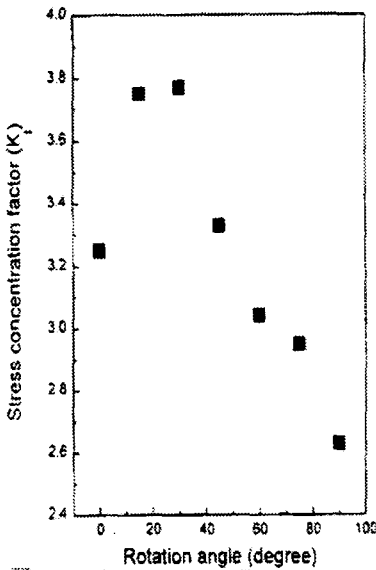


Fig 11 Relation between stress concentration factor ( $K_t$ ) and rotation angle when  $\ell = 3$

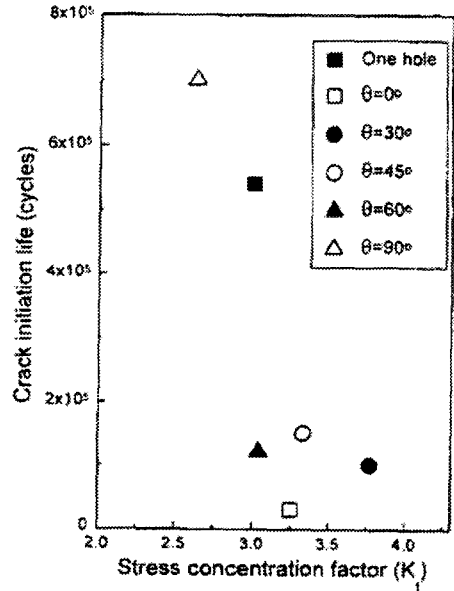


Fig. 12 Relation between crack initiation life and stress concentration factor

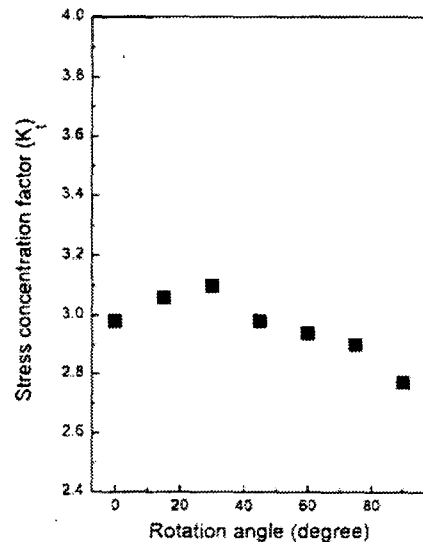


Fig. 13 Relation between stress concentration factor ( $K_t$ ) and rotation angle when  $\ell = 5$

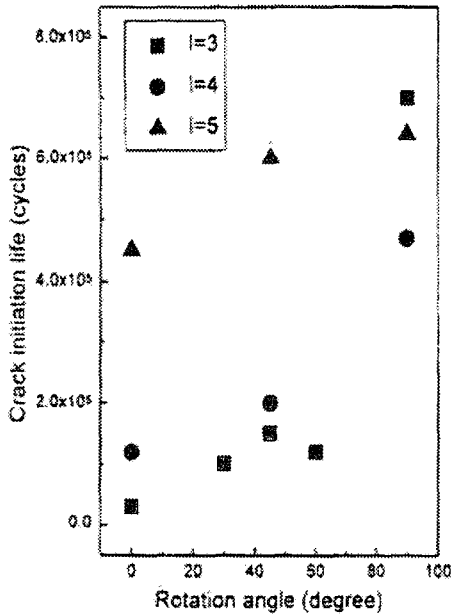


Fig. 14 Crack initiation life when the distances of two hole defects are  $l=3, 4, 5$

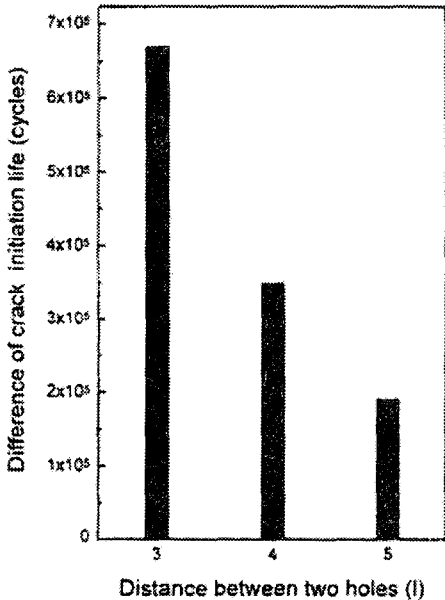
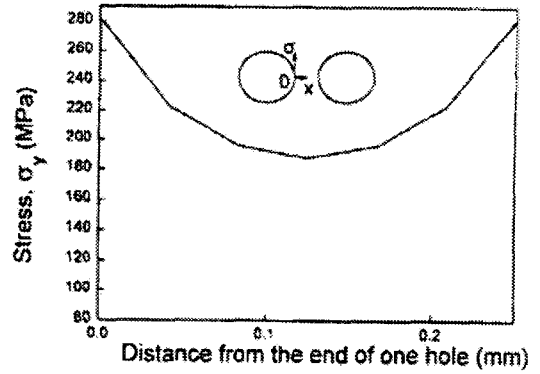
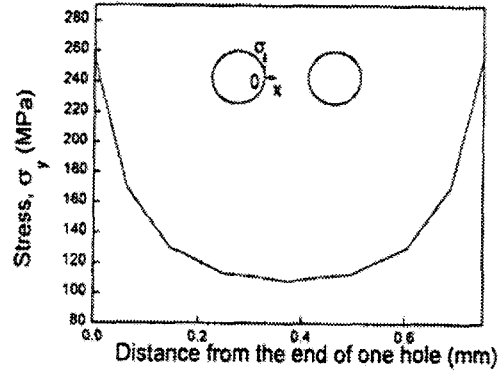


Fig 15 Difference of crack initiation life ( $N_i$  at  $90^\circ - N_i$  at  $0^\circ$ )



(a) Stress distribution when  $l=3$



(a) Stress distribution when  $l=5$

Fig. 16 Y-stress( $\sigma_y$ ) distribution between two holes ( $\theta=0^\circ$ )

Fig. 14는 미소원공 중심 사이의 거리가  $l=3, 4, 5$ 일 때 피로균열 발생수명의 변화를 나타낸다. Fig. 14에 나타난 바와 같이 무차원 미소원공간 거리  $l$ 이 커질수록 피로균열발생수명의 변화는 작아진다.

피로균열발생수명이 가장 큰 경우와 가장 작은 경우의 차이, 즉  $\theta=90^\circ$  일 때의 균열발생수명에서  $\theta=0^\circ$ 의 균열발생수명을 뺀 값은  $l=3$ 일 때는 약  $N=6.7 \times 10^5$  사이클,  $l=4$ 일 때는 약  $N=3.5 \times 10^5$  및  $l=5$ 일 때는 약  $N=1.9 \times 10^5$ 이다. 이를 Fig. 15에 나타내었다

Fig. 15에서와 같이 미소원공결함 사이의 거리가 커질수록 원공결함의 상대 위치에 따른 피로균열



발생수명의 변화는 급격히 작아진다. Fig. 16은 원공사이의 간섭이 응력에 미치는 영향을  $\theta=0^\circ$  일 때의 예로 나타낸 것이다. Fig. 16(a)는  $l=3$ 일 때이다. y축 방향의 응력이 최대  $\sigma_y=280\text{MPa}$ 까지 상승하며, 결함 사이의 응력은  $\sigma_y=200\text{MPa}$ 이상이다. Fig. 16(b)는  $l=5$ 일 때로 최대 응력은  $\sigma_y=260\text{MPa}$ 로  $l=3$ 일 때보다 작다. 원공에서 멀어지면서 응력은 급격히 감소하며 최소하중은 약  $\sigma_y=100\text{MPa}$ 로  $l=3$ 일 때의  $\sigma_y=200\text{MPa}$ 보다 훨씬 작다. 거리가 멀어질수록 미소원공 사이의 응력상승효과가 작아짐을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 15와 같이 미소원공결함 사이의 거리가 멀어짐에 따라 피로균열 발생수명의 변화는 작아진다고 생각된다.

#### 4. 결론

본 실험연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 피로균열의 발생수명은 두 개의 미소원공이 놓인 상태가  $\theta=0^\circ$ 에서 가장 작으며, 그 다음으로는  $\theta=30^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 의 순서이다.
- (2) 결함의 상호위치에 따라서 피로균열의 발생수명의 변화는 매우 크게 나타난다.
- (3) 미소원공결함 간의 거리가 가까운 경우  $\theta=0^\circ, 30^\circ$ 일 때 피로균열은 그것들의 안쪽사이에서 먼저 발생한다.
- (4) 미소원공이 놓인 상태가  $\theta=60^\circ$ 인 경우 피로균열은 그것들이 바깥쪽에서 먼저 발생한다.
- (5) 미소원공이 놓인 상태가  $\theta=45^\circ, 90^\circ$ 인 경우, 피로균열은 그것들의 바깥쪽 및 안쪽 사이에서 동시에 발생한다.
- (6) 두개의 미소결함사이의 피로균열의 발생수명에 영향을 주는 인자는 응력집중계수뿐만이 아니고, 응력변화, 응력분포, 미소결함간의 거리변화 및 그들의 놓이는 위치( $\theta$ )등도 포함된다.
- (7) 미소원공결함 사이의 거리 및 작용응력의 변화는 피로균열 발생수명에 영향을 준다.
- (8) 응력집중계수값의 변화는 피로균열발생수명에 영향을 미친다.

#### 후 기

본 논문은 (1998-001-E00159 자유공모과제) 한국

학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으므로 관계제위께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 송삼홍, 오환섭, 1987, "미소원공주위의 피로균열발생 전파거동에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제1권 제2호, pp. 250~258.
- (2) Trantina, G. C. and Barishpolsky, M., 1984, "Elastic-Plastic Analysis of Small Defect Void and Inclusion," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 20, No. 1, pp. 1~10.
- (3) Song, S. H. and Bae, J. S., 1998, "Fatigue Crack Initiation and Propagation from Hole," *Experimental Mechanics*, pp. 161~166.
- (4) 송삼홍, 김진봉, 1994, "유한요소해석에 의한 미소원공주위의 응력해석," 대한기계학회 논문집, 제18권 제3호, pp. 555~564.
- (5) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., 1982, "Interaction Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, pp. 373~386.
- (6) Miyoshi, T. and Tanabe, O., 1985, "Stress Intensity Factors for Surface Cracks with Arbitrary Shapes in Plates and Shells," *Fracture Mechanics 16th Symposium, ASTM STP868*, pp. 512~534.
- (7) Chang, R., 1982, "On Crack-Crack Interaction and Coalescence in Fatigue," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, No. 5, pp. 683~693.
- (8) Manson, S. S., 1953, "Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress," *Heat Transfer Symposium, Univ. of Michigan, Engineering Research Institute*, pp. 9~75.
- (9) Braglia, B. L., Hertzberg, R. W., 1979, "Crack Initiation in a High Strength Low-Alloy steel," *Fracture Mechanics, ASTM STP 677*.
- (10) Shin, C. S., Man, K. C., 1994, "A Practical Method to Estimate the stress Concentration of Notches," *Fatigue*, Vol.16, June, pp. 242~256.
- (11) Peterson, R. E., 1973, *Stress Concentration Factors*, John Wiley and Sons, p. 245.