

## 미소 표면 결함에서 발생하는 초기 균열의 거동에 미치는 응력장의 영향

### The Effects of Stress Fields on Behavior of Primary Cracks Initiated at Micro Surface Defects

김진봉\* · 김만근\*

Jin-Bong Kim · Man-Geun Kim

(1999년 3월 14일 접수, 1999년 7월 5일 채택)

#### ABSTRACT

This study has been performed to investigate the stress distribution around defects that behave as stress concentrators. Besides, the effect of stress interaction effects on the initiation of primary cracks were also investigated by rotary bending fatigue tests which were performed with specimens drilled micro surface defects and the stress distribution was analyzed using Finite Element Method. In addition, the stress interaction effects around defects and cracks were investigated by comparing the results of experiments and F.E.M.

The results obtained are summarized as follows ;

- 1) Area which slip and micro cracks initiated at micro surface defects is between the maximum shear stress points and this area is over than  $\pm 30^\circ$  from the maximum stress point along the defect edge.
- 2) The stress interaction effect for the small size defect is larger than that of large size defect when the interval between them is near.
- 3) Interval which there is no shear stress interaction effect analyzed by F.E.M. is larger than that of experimental results.

#### 1. 서론

기계 구조물이나 부품 소재에서 열화가 진행

되면 이들을 구성하고 있는 소재에 내재하여 있는 초기 결함이나 운전중에 발생하는 외부 결함에 의해 균열이 발생하거나 변형이 생겨 기계

---

\* 한서대학교 항공기계학과

구조물이나 부품의 기능 저하와 파손이 발생한다. 이와 같은 기계 구조물이나 부품의 기능 저하와 파손은 기계 사용자가 사전에 이를 방지하지 못할 경우에는 막대한 인적, 경제적 손실을 동반한 대형사고를 일으키게 된다. 이와 같은 중요성 때문에 균열의 발생 및 전파에 대한 연구는 여러 형태로 폭넓게 연구되어 왔으나 대부분은 거시적 균열에 대한 전파 거동에 관한 연구들이고 초기 균열의 발생 및 전파 거동에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다.

이와 같은 결함들이 피로 균열의 발생 및 전파 거동에 미치는 영향은 재료가 갖는 기지(基地) 경도의 대소에 따라 차이가 있으나<sup>1)</sup>, 이들이 피로 균열의 발생원이 되는 경우에는 경도의 대소에 관계없이 결함들을 포함한 국부 영역이 응력 집중원이 되며<sup>2,3)</sup>, 구조재의 피로 강도를 저하시키는 주된 요인이 된다<sup>4)</sup>.

한편 이들 결함들의 형상이나 크기는 다양하며, 결함들은 인접하거나 원접한 상태로 분포되어 있다<sup>5,6)</sup>. 이와 같이 다양하게 분포된 결함이나 이들 결함에서 발생된 균열들이 인접하여 있을 경우에는 상호 간섭으로 인하여 이들이 단독으로 존재할 경우와는 다르게 응력이 분포되고, 균열전파 거동도 다르게 된다. 즉 재료 내에 내재하여 있는 결함이 응력 집중원이 되어 이를 기점으로 균열이 발생되어 전파될 경우에는 이들 사이에서 분포되는 응력장의 간섭에 의한 증첩 효과<sup>7,8)</sup> 때문에 특이 응력장이 형성되어 응력 확대 계수가 급격하게 증가됨으로서 균열들은 서로 빠른 속도로 합체된다<sup>9,10)</sup>. 따라서 응력 집중원인 결함으로부터 발생되어 전파되는 초기 균열의 응력 집중원에 대한 응력 의존성과 응력의 상호 간섭 영향을 규명하는 것은 실사용 기계 구조물이나 소재 등의 안전성 및 수명 평가에 중요한 요소가 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 응력 집중원으로 작용하는 미소 결함으로부터 발생하는 초기 미소 균열의 거동에 미치는 응력장의 영향과, 크기가 같거나 다른 결함들이 인접하여 있는 경우에 이들 사이의 상호 간섭 영향을 규명하고자 한다. 이를 위하여 초기 미소 균열의 발생 상태를 실험을 통하여 관찰하였고, 실험에 사용된 시편

형상에 대한 유한 요소 해석을 하여 구한 응력 분포 결과를 적용시켜 초기 미소 균열의 발생에 미치는 응력장의 영향을 역학적으로 규명하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편 및 시험기

본 실험에서는 SM45C 환봉재( $\phi 11\text{mm}$ )를 사용하였으며 이 재료의 화학 성분과 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같고, 시험편 표면은 #1,500까지 연마지로 연마하고 입도가  $3\mu\text{m}$ 와  $0.05\mu\text{m}$ 인 산화 알루미늄을 사용하여 경면 연마를 한 후에 drill 가공을 하였다. 이와 같은 시험편의 가공 및 연마 등에 의한 잔류응력을 제거하고, 재질의 균질화를 위하여  $870^\circ\text{C}$ 에서 1시간동안 진공 annealing 처리를 하였다. 표면 미소 결함으로서 미소원공은 지름 크기의 순으로  $300\mu\text{m}$ ,  $500\mu\text{m}$ 의 drill을 사용하여 가공하였으며 깊이는  $375\mu\text{m}$ 로 동일하게 가공하였다.

한편 본 실험에 사용한 시험기는 SATEC사의 회전 굽힘 피로 시험기로서 최대 용량은  $22.5\text{N}\cdot\text{m}$ 이고 최대 회전수는  $10,000\text{rpm}$ 이다.

Table 1 Chemical composition of the test material

Material	Composition (Wt %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM 45C	0.45	0.18	0.8	0.019	0.006

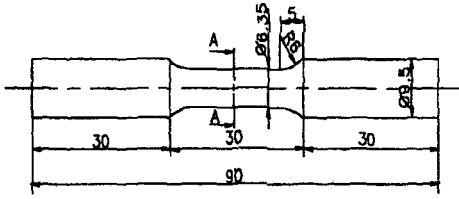
Table 2 Mechanical properties of the test specimen

Tensile Stress (MPa)	Yield Stress (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H <sub>RC</sub> )
603	333	27.1	85.3

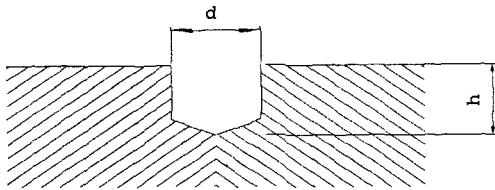
### 2.2 실험 방법

시험편에 부하 되는 응력 상태는 평활재 피로 한도( $\sigma_w=216\text{MPa}$ )의 120% 응력인  $260\text{MPa}$ 이고, 피로 균열의 관찰은 균열이 합체되기 전까지 매 1,000cycle마다 시험기에서 시험편을 분리시키지 않은 상태에서  $500\times$ 의 이동 현미경으

로 관찰하였으며 사진 촬영을 할 경우에만 시험편을 시험기에서 분리하였다.



(a) Specimen for rotary bending fatigue test



(b) Detail of section A-A

Fig. 1 Configuration of rotary bending test specimen

### 2.3 유한 요소 해석

재료 내에 결함이 존재하는 경우에 이들을 기점으로 발생하여 전파되는 균열 거동을 해석하기 위해 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 해석 모델을 이용하여 응력장을 검토하였다. 해석 model은 단면이 7(mm)×7(mm)이고 길이가 100mm인 사각 단면 보의 표면 중앙에 미소 원통형 결함이 있는 형태이다. 한편 보 전체에 비해 결함의 크기가 매우 작기 때문에 이를 확대한 대표적인 형상은 Fig. 2의 좌측 상단에 보인 바와 같다.

미소 결함의 형상을 원통형으로 한 이유는 실제 문제에서 접하게 되는 결함 형상이 구(球)형, 반구(半球)형, 반타원형이나 원통형 등 다양하나, 결함재에 대한 최근의 연구 결과 중 미소 drill을 이용하여 인공적으로 결함을 가공하는 연구가 행하여지고 있는 것을 고려하여, drill 형상의 결함 중 drill 사심(死心: dead center)의 각도가 180°인 경우로 가정하여 원통형으로 하였다. 한편 결함의 지름(d)는 300 μm, 500 μm로 하였으며, 길이(h)는 375 μm로 하여 해석하였다. 그리고 결함들 간 응력의 간섭이나 이 결함들로부터 발생되는 균열들이 서로 간섭하여 상승 효과를 나타

내는 영향을 평가하기 위하여, 마주하는 초기 결함 선단간 간격을 150 μm, 225 μm, 300 μm, 400 μm가 되도록 배치하여 결함들의 선단간 거리(s) 대 반지름(r)의 비(e=s/r)가 1, 1.5, 2, 그리고 3인 4가지 경우에 대해 해석하였다. 한편 서로 마주하는 결함의 형태는 동일 크기의 결함이 마주하는 경우와 반지름의 비(r<sub>1</sub>:r<sub>2</sub>)가 1:1.67인 결함이 마주하는 2가지 경우에 대하여 해석하였다.

보의 지지 형태 및 하중방식은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 보의 양단이 단순 지지되고, 보의 중앙에 위치한 결함의 반대편에 하중이 가해지는 3점 굽힘 방식으로 하였다.

해석을 위하여 상용화된 구조 해석 program을 사용하였고, 사용된 요소는 8-node solid이며 절점수 및 해석에 사용된 특성치는 Table 3에서 보는 바와 같다. 한편 사각 보의 중앙에 결함을 배치시켰기 때문에 보 중앙을 중심으로 전체 형상이 길이 방향으로 대칭이 되기 때문에, 이들 결함을 포함한 보의 전체 길이를 2등분하여 해석하였다. 그리고 2등분된 보를 22 block으로 분할하였고, 결함에 근접할수록 각 block 및 요소의 크기는 미세하게 하였으며 결함 주위의 block에서는 해의 오차를 감소시키기 위하여 결함을 기점으로 block 끝단까지 1:10 비율로 요소를 분할하였다. 한편 결함 주위 요소의 평균 크기는 결함 직경의 1/10이 되도록 하였다.

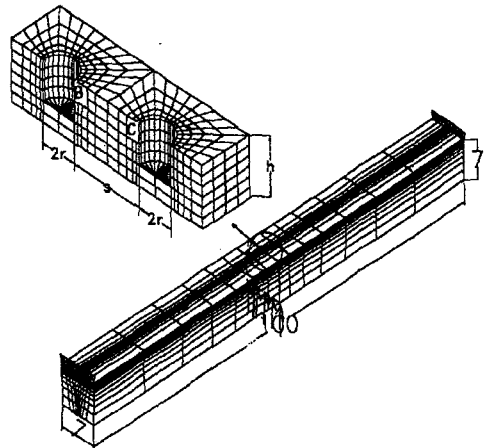


Fig. 2 3D model of analysis specimen

Table 3 Characteristics of analysis model

(a) Dimension and properties of analysis model

Dimension (mm)	Young's modulus (GPa)	Maximum bending stress (MPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )
7×7×100	196	196	0.3

(b) Number of nodes and elements of analysis model

Defect type	Number of nodes	Number of elements
Single hole	1,577	984
Twin holes	1,932	1,044
Different size holes	1,924	780

### 3. 실험 및 유한 요소 해석 결과

Photo 1은 미소 결함의 직경이  $d=300\mu\text{m}$ ,  $500\mu\text{m}$ 인 경우에  $N/N_f=4.5\%$ 에서 slip 및 미시 균열의 발생 상태를 관찰한 일 예이다. 여기서  $N_f$ 는 시편의 파단 수명이고,  $N$ 은 임의의 응력 반복 수이다. Photo 1에서 slip 및 미시 균열은, 미소 결함의 직경과 관계없이 미소 결함 주위의 응력 집중이 최대인 점에서만 발생하지 않고, 이점을 포함하는 임의의 영역에서 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 slip 및 미시 균열의 발생시기는 미소 결함의 직경과 관계없이  $N/N_f$ 의 4.5%이내 범위이고, 이들은 응력이 집중되는 국부 영역의 금속 조직 중 경도치가 낮은 ferrite 결정입내(結晶粒內)에서 발생하여<sup>11)</sup> 응력 반복수가 증가함에 따라 그 수가 증가하며, 그 중 임의의 미시균열에서 균열은 성장하게 된다.

Slip 및 미시 균열의 분포 상태를 구체적으로 살펴보면 Photo 2에서 보는 바와 같이 하중방향에 수직인 최대응력이 작용하는 A점을 기점으로  $\pm 30^\circ$  범위 이상인 것을 알 수 있다. Photo 2에서 결함의 크기에 따라 slip과 미시 균열 발생 영역을 결함 중심에서의 분포 각도 (이하  $\theta_d$ )로 비교하면,  $d=300\mu\text{m}$ 인 경우는  $\theta_d=74^\circ$  이고,  $d=500\mu\text{m}$ 인 경우는  $\theta_d=68^\circ$  로 작은 결함축의  $\theta_d$ 가 큰 결함축보다 크게 되었다.

이와 같이 slip이나 미시 균열들이 결함 주위에서 발생하는 위치는 응력집중이 최대로 작용하는 점을 포함하는 국부적 영역 중 최대 전단

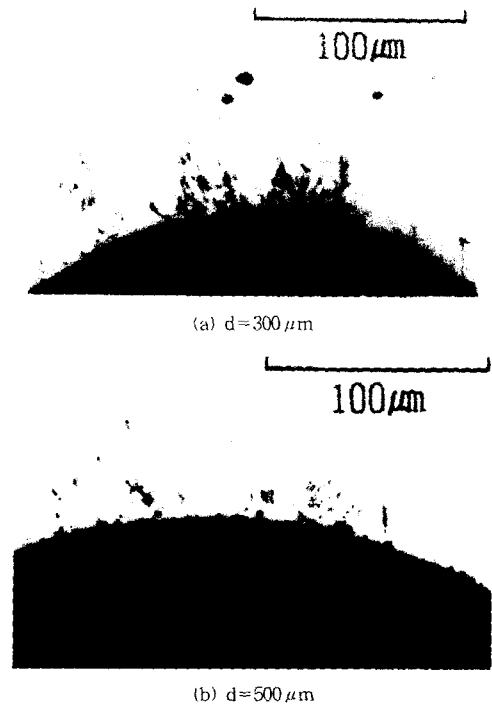


Photo 1 Behavior of slip and micro cracks around micro defect ( $N/N_f=4.5\%$ ,  $N_f=1.1 \times 10^6$  cycles)

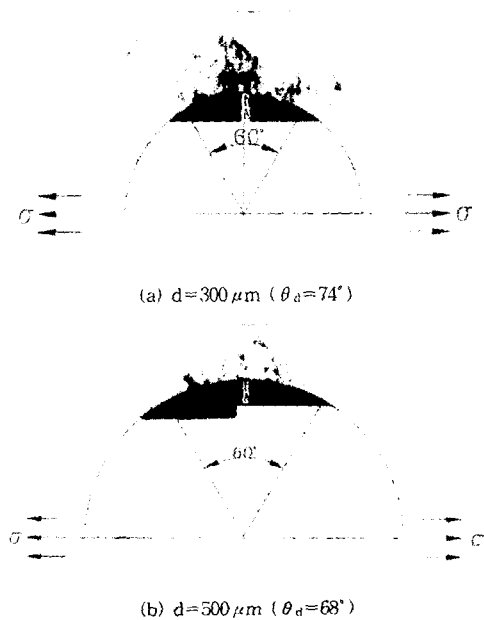


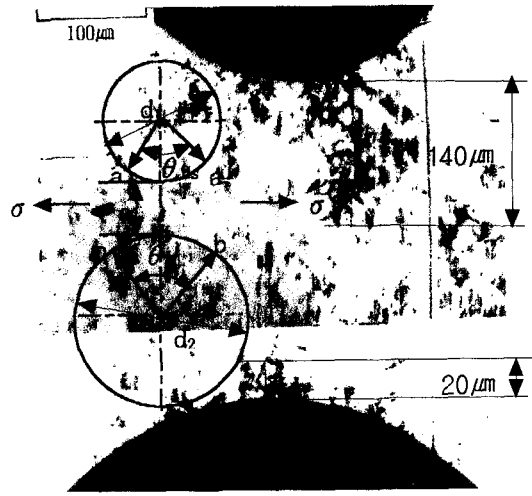
Photo 2 Initiation area of slip and micro cracks around micro defects

응력이 작용하는 범위 내에서 발생할 것으로 예상된다.

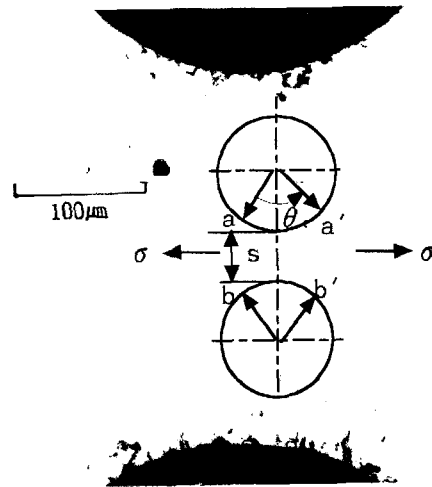
이상에서의 분포 각도는 다음과 같이 구하였다.  $N/N_f=4.5\%$  이내에서 국부적으로 발생하기 시작한 slip 및 미시 균열은  $N/N_f=10\%$  정도가 되면 Photo 2에서와 같이 최대 전단 응력 작용점 부근과 그 사이에서 발생하였다.  $N/N_f=10\%$  이상에서  $N/N_f=20\%$ 까지는  $N/N_f=1\%$ 의 간격으로 피로 시험을 한 후 현미경으로 slip이나 미시 균열 분포 범위의 확대 유무를 관찰하여, 이들의 발생 범위가 확대되지 않고 일정한 경우에서 사진 촬영을 하여 분포 각도를 결정하였다.

결합들이 인접하여 있는 경우에 결합 사이에서 발생하는 피로 균열은 결합사이의 응력의 간섭 영향을 받을 것으로 생각된다. 이와 같은 응력의 간섭이 피로 균열의 발생에 미치는 영향을 규명하기 위하여 크기가 같은 결합( $d=300\mu\text{m}$ )들이 있는 모델(이하 ET 모델)과 크기가 다른 결합( $d=300\mu\text{m}, 500\mu\text{m}$ )들이 있는 모델(이하 ED 모델)에 대해 결합간 간격을 변화시키며 회전 굽힘 시험을 실시한 결과와 유한 요소법을 이용하여 응력을 해석한 결과를 상호 비교하면 다음과 같다.

Photo 3은 결합간 간격이  $e=2$  일 때 ED 모델의 경우(a)와 ET 모델의 경우(b)에서 slip 및 미시 균열의 분포 상태를 나타낸 것이다. Photo 3(a)에서 slip 및 미시 균열의  $\theta_d$ 는 결합 중심을 기점으로  $d=300\mu\text{m}$  측은  $\theta_{ds}=76^\circ$ ,  $d=500\mu\text{m}$  측은  $\theta_{ds}=72^\circ$  이고 (b)의 경우는  $68^\circ$  가 되는데, 분포 각도가 ED 모델이 ET 모델보다 큰 이유는 동일 간격으로 결합들이 분포되어 있는 경우, 동일 크기의 결합이 인접한 경우보다 한 편에 큰 결합이 있을 때에 응력의 간섭 영향이 크기 때문으로 생각된다. 한편 (a)의 경우 작은 결합측에서 발생한 주 균열의 길이는  $140\mu\text{m}$ 가 된 반면 큰 결합 측에서 발생한 미시 균열의 길이는  $20\mu\text{m}$  정도가 되었다. 이러한 결과는 큰 결합에 의한 작은 결합측의 응력증분 효과가 동일 크기의 작은 결합에 의한 응력증분 효과보다 크게 되고, 큰 결합 측보다는 작은 결합 측에서 응력의 간섭 영향이 크게 되는 것에 기인한 것으로 추정된다.



(a)  $d_1=300\mu\text{m}, d_2=500\mu\text{m}$   
 ( $\theta_{ds}=76^\circ, \theta_{ds}=72^\circ, N/N_f=20\%, N_f=1.3 \times 10^3 \text{ cycle}$ )



(b)  $d=300\mu\text{m}$  ( $\theta_a=68^\circ, N/N_f=10\%, N_f=1.1 \times 10^3 \text{ cycle}$ )

Photo 3 Initiation of slips and micro cracks around micro surface defects  
 (Interval  $s=300\mu\text{m}, e=s/r=2$ )

결합 크기가 다른 조건에서 결합간 간격이 변할 경우에 slip 및 미시 균열의 분포각도 변화를 실험으로 구한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에서 부호  $\bigcirc$ 와  $\square$ 로 표시한 값은 ED 모델에 대한 값으로  $\bigcirc$ 는 a-a',  $\square$ 는 b-b' 사이의 분포 각도를 나타내며,  $\bullet$ 는 ET 모델의 경우에

a-a', b-b' 사이의 분포 각도를 나타내는 것이다. 여기서 동일 직경의 결함들이 인접하여 있는 경우보다 서로 다른 직경의 결함이 인접하여 있을 때의 분포 각도( $\theta_d$ )가 전반적으로 큰 것을 알 수 있고, 직경이 서로 다른 결함들이 인접하여 있을 경우에  $d=500\mu\text{m}$ 인 결함에서 보다  $d=300\mu\text{m}$ 인 결함측에서의 분포 각도( $\theta_d$ )가 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 결함 사이의 간격이 인접하여 있을 때의 분포 각도( $\theta_d$ )가 작은 결함측이 크고 동일 직경( $d=300\mu\text{m}$ )의 결함이 있을 때보다 큰 결함이 있을 때의 작은 결함측( $d=300\mu\text{m}$ )의 분포 각도( $\theta_d$ )가 크게 되는 것은 이들 결함 사이의 응력의 간섭으로 인한 것으로 사료된다.

이를 규명하기 위하여 유한 요소법으로 실험에 적용한 동일 크기의 결함들에 대한 응력 해석을 하여, slip 및 미시 균열의 발생에 미치는 응력의 간섭영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

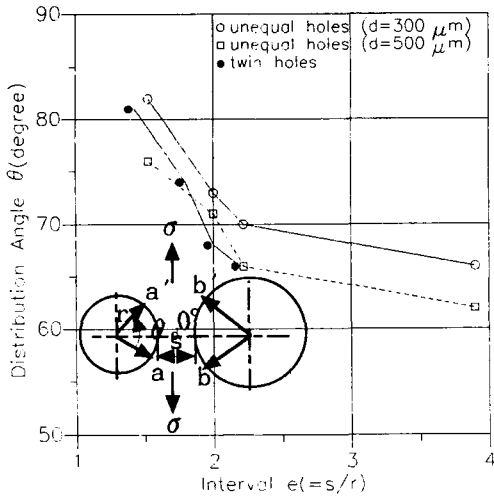


Fig. 3 Distribution angles of slips and micro cracks around micro surface defects

Fig. 4와 Fig. 5는 각각에 대한 유한 요소 해석으로, 결함간 간격이 변할 경우에 결함 원주의 전단 응력 분포를 구한 결과이다. Fig. 4는 ET 모델과 ED 모델에서 원공 원주에 대한 전단 응력 분포를 구한 것이다. 여기서 실선으로 나타낸 것은 ED 모델에서의 작은 원공측 ( $d=$

$300\mu\text{m}$ )에 대한 해석 결과이고 점선으로 나타낸 것은 ET 모델에 대한 해석 결과인데, 최대 전단 응력은  $\theta=30^\circ$ 에서 발생하며, slip 및 미시 균열에 큰 영향을 미치는 범위( $0^\circ \leq \theta < 55^\circ$ )에서 ED 모델에서의 전단 응력이 ET 모델에서의 전단 응력보다 크다.

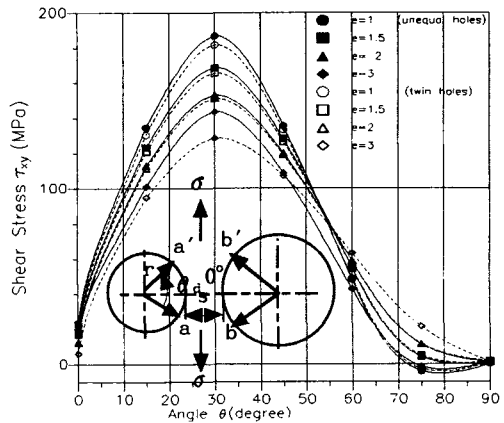


Fig. 4 Shear stress distributions around micro defects (In case of the unequal defects,  $d=300\mu\text{m}$  side)

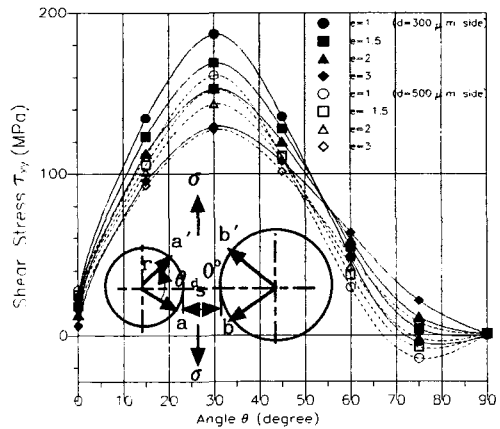


Fig. 5 Shear stress distribution around unequal micro defects

Fig. 5는 ED 모델에서  $d=300\mu\text{m}$ 와  $500\mu\text{m}$ 인 결함이 있을 때에, 결함간 간격의 변화에 따른 원공 원주에 대한 전단응력 분포를 해석한 결과이다. 여기서 실선은  $d=300\mu\text{m}$ 인 결함에 대한 해석 결과이고, 점선은  $d=500\mu\text{m}$ 인 결함

에 대한 해석 결과로  $d=300\mu\text{m}$ 인 결함에서의 전단응력이  $d=500\mu\text{m}$  결함에서의 전단 응력보다 크게 된다.

이상의 Fig. 3의 실험결과와 Fig. 4와 Fig. 5의 유한 요소법에 의한 전단응력 해석 결과를 비교하여 종합하면, 결함 주위에서 발생하는 slip 및 미시 균열은 결함 주위의 최대 전단응력에 의하여 영향을 받고, 결함들이 인접하여 있을 경우에 결함 주위에서의 slip 및 미시 균열 발생의 분포각도는 응력의 간섭 정도에 따라 지배를 받을 수 있다.

이와 같이 결함 주위에서의 slip 및 미시 균열 발생의 분포 각도에 미치는 응력의 간섭 정도를 규명하기 위하여 간섭 영향 계수  $\gamma$ <sup>5)</sup>를 다음과 같이 정의하고, 이를 이용하여 실험 결과와 유한요소법에 의한 결과를 비교하고자 한다.

$$\gamma = \frac{\text{2개의 결함이 인접하거나 원접할 때의 최대 전단 응력}}{\text{1개의 결함만이 존재할 때의 최대 전단 응력}}$$

또는

2개의 결함이 인접하거나 원접할 때의 slip 및 미시 균열의 분포 각도

1개의 결함만이 존재할 때의 slip 및 미시 균열의 분포 각도

Fig. 6은 결함간 간격이 변할 경우에 간섭 영향 계수  $\gamma$ 의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 유한요소법으로 구한 응력의 간섭 영향계수는 동일 크기의 하나의 결함에 대한 최대 전단 응력으로 인접한 결함에 대한 최대 전단 응력을 나눈 값이고, 실험 결과에서 구한 간섭 영향 계수는 하나의 결함이 있을 경우에 대한  $\theta_d$ 로 결함이 인접하여 있을 경우에 대한  $\theta_d$ 를 나눈 값이다.

이와 같이 간섭 영향 계수  $\gamma$ 를 정의하고 이들을 비교한 이유는 다음과 같다. 다수의 결함이 재료내에 분포되어 있을 경우에 이들 사이의 간격은 인접하거나 원접하게 된다. 이들 결함 사이의 간격이 원접한 경우에는 각 결함들 주위에는 독립적인 응력장이 형성되는데 이 경우의 응력장은 1개의 결함만이 존재할 경우 이 결함에서 분포되는 응력장과 같은 형태가 되고, 아울러 두 경우에서 분포되는 slip 및 미시 균열의 발생 형태도 동일하게 된다. 아울러 결함 사이의 간격이 인접하여 응력의 간섭 효과가 발생하면, 결함이 1개만 존재할 경우보다 응력이 증가

하여 slip 및 미시 균열의 발생 범위도 증가할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 간섭 영향 계수  $\gamma$ 가 1인 경우는 결함 간 응력의 간섭 영향이 없고 1보다 큰 경우는 결함간 응력의 간섭 영향이 있는 것으로 규정하고, 이를 이용하여 응력의 독립성이 유지되는 결함간 간격을 구하였다.

Fig. 6에서 유한요소법을 이용하여 구한 최대 전단 응력의 간섭 영향 계수는 실험에 의해 구한 slip 및 미시 균열의 발생에 대한 간섭 영향 계수보다 5~10% 정도로 크지만 동일 크기 결함 및 다른 크기 결함에 관계없이 결함 간격에 대해서 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 인접한 결함에서 발생하는 slip이나 미시 균열의 발생 정도는 최대 전단 응력의 간섭 정도와 거의 동일함을 알 수 있다.

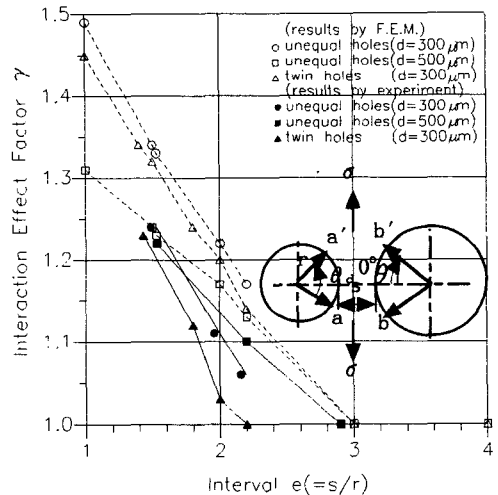


Fig. 6 Shear stress interaction factors with variation of interval e

아울러 미소 결함이 마주하여 있을 경우, 이들 사이에서 응력장의 간섭이 없는 범위( $\gamma=1$ 인 경우)는 다음과 같다. 실험 결과의 경우  $d=300\mu\text{m}$ 인 동일 크기의 미소 결함이 있을 때( $\blacktriangle$ )는 결함 선단 간 간격  $e(s/r)$ 이 2.2이상,  $d=300\mu\text{m}$ 인 결함과  $d=500\mu\text{m}$ 인 서로 다른 크기의 미소 결함이 마주하고 있을 때( $\bullet$ )는  $e$ 가 2.4인 경우에 응력의 간섭 효과가 발생하지 않게 된

다. 한편 유한요소법에 의한 해석의 경우는 동일 크기의 미소 결함이 있을 때( $\Delta$ )에는  $e$ 가 2.7 이상, 서로 다른 크기의 결함이 있을 때( $\bigcirc$ )는 2.8 이상이 되어 실험에서 구한 결과 보다 그 범위가 다소 크게 구하여 졌다.

#### 4. 결 론

응력 집중원인 미소 결함에서 발생하여 전파하는 균열들에 대한 응력분포의 영향을 규명하기 위하여, 미소 결함재에 대하여 실험과 유한요소 해석을 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 미소 결함에서 slip 및 미시 균열들이 결함 주위에 발생하는 위치는 응력 집중이 최대로 작용하는 점을 포함하는 최대 전단 응력이 작용하는 범위 이내에서 발생하고, 이 범위는 하중방향에 수직인 최대 응력 작용점을 기점으로 결함 중심으로부터  $\pm 30^\circ$  이상이다.
- 2) 동일 크기의 미소 결함 ( $d=300\mu\text{m}$ )이 있는 경우와 한편에 직경이 큰 미소 결함( $d=300\mu\text{m}$ ,  $d=500\mu\text{m}$ )이 있는 경우에 큰 결함에 의한 작은 결함측에의 응력 간섭효과는 동일 크기의 작은 결함 사이의 간섭 효과보다 크게 되고, 큰 결함측보다는 작은 결함측에서 응력의 간섭 영향이 크게 된다.
- 3) 인접한 미소 결함사이에서 유한요소법을 이용하여 구한 최대 전단 응력의 간섭 영향은 실험에 의해 구한 slip 및 미시 균열의 발생에 대한 간섭영향보다 5~10% 정도 크게 해석되었고, 응력의 독립성이 유지되는 범위는 실험 결과의 경우는 ET 모델에서는  $e>2.2$ 이고 ED 모델에서는  $e>2.4$ 이며, 유한요소법에 의한 해석의 경우는 ET 모델에서는  $e>2.7$ 이고 ED 모델에서는  $e>2.8$ 가 되어 유한 요소법에 의해 구한 범위가 실험에 의해 구한 범위보다 다소 크게 구하여 졌다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 宋森弘, 國尾武, “高硬度鋼のミクロ領域における疲労き裂生成過程”, 日本機械學論文集, Vol. 40, No. 334, pp. 1503~1510, 1974.
- 2) Trantina, G.G. and Barishpolsky, M., “Elastic-Plastic Analysis of Small Defect-Void and Inclusion”, Engng. Fracture Mech., Vol. 20, No. 1, pp. 1~10, 1984.
- 3) 송삼홍, 오환섭, “표면 결함에서 발생하는 피로크랙 거동”, 대한기계학회 논문집, Vol. 9, No. 2. pp. 150~157, 1985.
- 4) Endo, M., Murakami, Y., “Effects of an Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steel”, Trans. ASME, Vol. 109, pp. 124~129, 1987.
- 5) Y. Murakami and S. Nemat-Nasser, “Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, No. 3, pp. 373~386, 1982.
- 6) 송삼홍, 김진봉, “미소 결함간의 응력의 간섭과 응력장 해석”, 대한기계학회 논문집, Vol. 19, No. 5, pp. 1259-1268, 1995.
- 7) Horii, H. and Nemat-Nasser, S., “Elastic Fields of Interacting Inhomogeneities”, Int. J. Solids Structures, Vol. 21, No. 7, pp. 731~745, 1985.
- 8) Sam Hong Song and Jin Bong Kim, “Analysis of Stress Distribution Around Defects and Inclusions by F.E.M.”, KSME Journal, Vol. 9, No. 3, pp. 351~359, 1995.
- 9) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., “Growth and Stability of Interacting Surface Flaws of Arbitrary Shape”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 17, No. 3, pp. 193~210, 1983.
- 10) Heath, B.J. and Grandt, A.F. Jr., “Stress Intensity Factors for Coalescing and Single Corner Flaws along a Hole Bore in a Plate”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 4, pp. 665~673, 1984.
- 11) 송삼홍, 오환섭, “미소 원공 주위의 피로크랙 발생 전과 거동에 관한 연구”, 제1회 재료 강도 Symposium 초록집, pp. 251~258, 1987.