

# 불규칙하게 분포된 미소결함사이의 응력간섭 및 피로균열 거동에 대한 실험적 연구 (II) (결함간의 거리 및 하중변화를 중심으로)

송삼홍\*, 배준수\*\*, 최병호\*\*\*

## An Experimental Study on the Fatigue Behavior and Stress Interaction of Arbitrarily Located Defects (II) (For Variable Loads and Distances between Defects)

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

### ABSTRACT

If defects are located far apart, fatigue cracks are independently initiated from them and gradually approach other cracks so that the fatigue life becomes influenced by the crack growth behavior of those interacting cracks. In this study, the effect of the stress interaction between defects on the fatigue crack propagation behavior is investigated experimentally and these results are verified by finite element method. In addition, fatigue crack propagation behaviors under micro hole interaction field are studied.

**Key Words** : Fatigue Crack Propagation(피로균열전파), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Von Mises Stress(Von Mises 상당응력), Finite Element Analysis Model(유한요소해석모델), Plastic Zone(소성역), Stress Interaction(응력간섭)

### 기호설명

<p>L : 미소원공 중심 사이의 거리 (mm)</p> <p><math>\ell (=L/r)</math> : 무차원화된 미소원공 사이의 중심거리</p> <p>r : 미소원공의 반지름 (mm)</p> <p><math>\theta</math> : 하중축의 수직방향과 두 개의 원공노치 중심을 연결한 선 사이의 각도 (°)</p> <p><math>\phi</math> : 원공 둘레에서의 한 점의 위치 (°)</p> <p><math>\sigma_{max}</math> : 원공주위에 작용한 최대응력 (MPa)</p> <p><math>\sigma_{app}</math> : 작용응력 (MPa)</p>	<p>a : 피로균열길이 (mm)</p> <p>N : 응력반복수 (cycles)</p> <p><math>K_I</math> : 응력집중계수</p> <p><math>K_{rI}</math> : 피로노치계수</p> <p><math>K_{II}</math> : 모드 I 응력확대계수 (<math>MPa\sqrt{m}</math>)</p> <p><math>K_{I0}</math> : 원공간섭이 없는 경우의 모드 I 응력확대계수 (<math>MPa\sqrt{m}</math>)</p> <p><math>K_{II}</math> : 모드 II 응력확대계수 (<math>MPa\sqrt{m}</math>)</p>
---	---

\* 고려대학교 기계공학과

\*\* Faculty of Post Doc., Northwestern University

\*\*\* 고려대학교 대학원

## 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 없기 때문에 자연결함 대신에 인공결함을 이용하여 미소결합재의 특성을 연구하여 왔다. 즉, 결함이나 개재물은 피로강도 및 피로거동에 어떻게 기여하는가를 규명하기 위해서는 이들의 형상, 크기, 종류 등이 달라도 이들이 갖는 역학적 인자만을 고려하면, 인공 미소결함을 갖는 결함재의 피로 파괴거동은 결함의 기하학적인 형상을 인자로 취급함으로써 피로 파괴거동에 대한 결함의 영향을 규명할 수 있다.

한편 상기의 결함이나 개재물들이 재료내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고 분포되어 있는 상태도 인접하거나 원접하는 등 다양하다. 이와 같이 다양하게 분포된 결함이나 균열들 사이의 응력이나 균열전파거동<sup>(5)</sup>은 이들이 서로 인접하여 있을 때와는 다르게 응력이 분포되고 피로균열전파거동도 다르게 된다. 이에 관련된 연구로서는 결함이나 개재물 사이의 응력장의 간섭에 관한 것, 균열사이의 응력확대계수를 구하여 균열의 간섭영향을 구한 것,<sup>(6)</sup> Notch나 결함에서 발생하여 전파하는 균열의 전파속도를 실험에 의하여 간섭영향을 구한 것, 그밖에 균열들의 간섭과 합체에 의한 균열전파 수명의 감소를 평가한 것<sup>(7),(8)</sup> 등이 있다. 이들 연구결과를 종합하면 결함이나 균열이 인접하여 있을 경우 이들 사이의 응력장간섭에 의하여 특히 응력장이 형성되어 응력확대계수가 급격하게 증가함으로써 피로균열은 서로 빠른 속도로 합체된다는 것이 예상된다. 그러나 이와 같은 응력장의 간섭에 따른 초기균열의 발생 및 전파거동을 파악하기 위해서는 결함이나 개재물 주위의 응력집중이나 이들의 분포 및 간섭형태를 규명하여야 한다.

이러한 문제와 관련하여 송 등<sup>(9)</sup>은 우선 불규칙하게 분포되어 있는 미소결합들 사이에 발생하는 피로균열을 고찰한 결과 1) 결함의 상호위치에 따라서 피로균열의 발생수명은 다르다. 2) 미소결

합 사이의 거리가 가까울수록 피로균열은 그것들의 안쪽에서 먼저 발생한다. 3) 결함간의 피로균열 발생수명에 영향을 주는 인자는 응력집중계수, 응력변화, 응력분포 이외에 놓이는 위치 등도 포함된다는 결론을 얻었다.

그러나 미소결합간의 거리가 변화하면 그것들의 간섭때문에 피로균열전파방향은 어떻게 변화하는가, 미소원공간의 위치 및 하중변화에 따라서 피로균열 방향의 변화는 어떠한가, 또는 가해지는 하중 및 미소원공간의 거리 등의 변화에 따른 피로균열전파속도의 변화는 어떠한가 등 많은 의문점이 남는다.

따라서 본 연구에서는 불규칙하게 표면에 분포된 미소원공 결함간의 위치, 거리 및 작용하중의 변화에 따른 균열 간섭과 피로균열전파방향의 변화, 유한요소법을 이용하였을 경우 피로균열의 전파방향 검토 및 결함사이의 거리변화에 따른 피로균열 전파속도의 변화 특성에 대한 것 등을 고찰하려고 한다.

## 2. 시험편 준비 및 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 ASTM에 규정된 A15086이다. 이 재료의 기계적 성질 및 화학적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다. 작용하중은 면외굽힘 하중이며 시험편은 시험편 중앙에 미소 원공 노치를 가공하여 사용하였다. 두 미소 원공간의 위치는 Fig. 2와 같이 하중축의 수직 방향과 두 개의 원공노치 중심을 연결한 선과의 각도가  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  가 되도록 하였다. Fig. 2에서  $\phi$ 는 원공둘레에서의 한 점의 위치이다.

본 실험에서의 미소 원공결합들은 임의의 각도와 거리를 갖도록 다양하게 배열하였다. 결함의 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 결함 노치를 사용하였다. 또한 결함의 분포 위치는 결함 중심간의 거리와 각도로 표시하였다.

사용한 시험기는 굽힘 및 피로시험기 Shimazu

의 TB-10이다. 이 시험기의 최대 모멘트 진폭은 98N-m이며, 매 분당 회전수는 2000rpm이다.

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

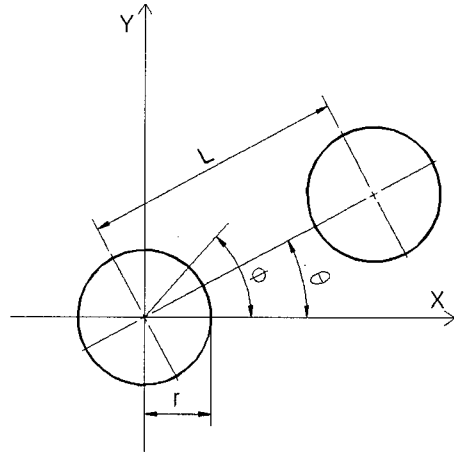


Fig. 2 Relative position of two micro hole defects

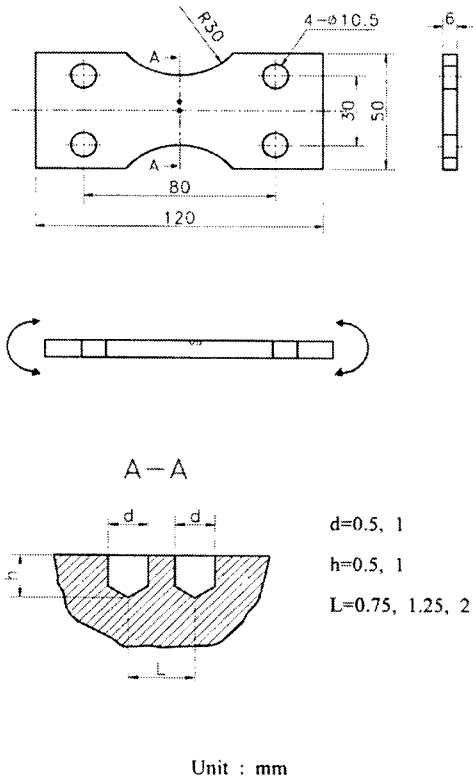


Fig. 1 Geometries of bending test specimen

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미소 원공결합간의 거리 변화에 따른 간섭과 피로균열전파방향의 변화

불규칙하게 분포된 여러개의 결함에서 피로균열이 성장할 경우, 균열간의 거리나 응력분포에 따라 균열간의 합체가 일어날 수도 있고 긴 균열은 짧은 균열의 성장을 정지시킬 수도 있다. 그 이유는 결함이나 균열이 상호간섭을 일으켜 응력장이 변하기 때문이라고 생각된다. Fig. 3은 균열이 전파하다가 균열들사이의 상호간섭으로 인하여 정지된 모습을 보여준다. 원공과 원공 사이의 균열은 정지하였으며, 원공 바깥쪽의 균열은 계속 성장하였다. 본 절에서는 결함사이의 거리를 변화시켜 각각의 경우에 대하여 피로균열 전파방향과 속도에 대하여 고찰하려고 한다. 원공사이의 각도를  $\theta=45^\circ$  로 고정시키고, 원공 중심간의 거리를  $L=0.75, 1.25, 1.5\text{mm}$ 로 변화시켰다. 즉,  $\ell=L/r=3, 5, 6$ 인 경우에 대하여 실험하였다.

Fig. 4는 각 경우에 대한 피로균열 전파거동을 관찰한 결과를 모델화하여 나타낸 것이다. 결함이 매우 인접하여 있을 경우( $L=0.75\text{mm}, \ell=3$ ), 균열은 결함간의 간섭영향으로 만들어진 응력집중부에서 발생한다. 결함 사이의 균열은 전파하면서 상대편 결함으로 합체된다(Fig. 4(a)). 이 때 균열의 전파방향은 최대주응력 조건<sup>(9)</sup>을 적용하여 예측이 가능하다<sup>(10)</sup>. 반복하중이 계속 가해짐에 따라 원공

바깥쪽의 균열은 계속 성장한다. 결함사이의 거리가 이보다 멀리 떨어져 있을 경우( $L=1.25\text{mm}$ ,  $\ell=5$ ), 결함이 인접하여 있는 부분의 균열은 다른 편 결함을 향하여 휘어지면서 전파한다(Fig. 4(b)). 상대편 결함을 향해서 전파하다가 다른 균열과의 간섭효과로 인하여 정지하고, 원공 바깥쪽 균열이 계속 성장하여 파괴가 일어날 때까지 이 균열은 성장하지 않는다. 또한, 결함간의 거리가 멀 경우( $L=1.5\text{mm}$ ,  $\ell=6$ ), 균열은 다른 결함의 영향을 받지 않고 독립적으로 발생하여 일정사이클 동안 성장한다. 두 개의 결함 중 기하학적으로 균열발생이 유리한 원공에서 균열이 빨리 성장한다. 균열이 계속 성장하다가 균열발생이 빠른 결함의 균열은 계속 성장하고 다른 편 결함의 균열은 약  $a=0.2\text{mm}$ 에서 정지하였다(Fig. 4(c)). 즉, 주균열이 작용응력을 차단하기 때문에 짧은 균열은 더 이상 전파하지 않는다. 위의 결과를 종합하면,  $\theta=45^\circ$ ,  $L \leq 1.5\text{mm}$  ( $\ell \leq 6$ ) 일 때는 균열이 원공의 간섭영향을 받으며  $L > 1.5\text{mm}$  ( $\ell > 6$ ) 일 때는 간섭영향을 받지 않는다.

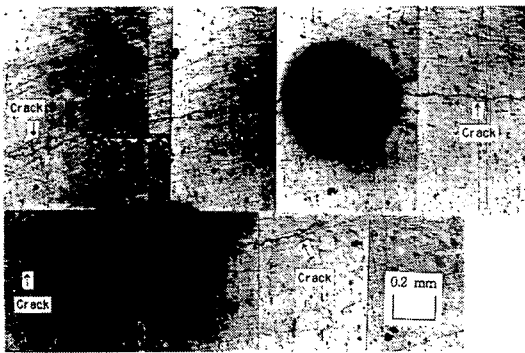


Fig. 3 Crack propagation path under bending (Case I)

### 3.2 유한 요소법을 이용한 경우의 원공 결함 사이에서 발생한 피로균열의 전파방향 고찰

3.1절에서 실험으로 관찰한  $\ell=3$ ,  $\theta=45^\circ$  (Case I)일 때의 원공 사이의 피로균열 전파방향을 해석을 통하여 고찰하였다(Fig. 3).

본 절에서는 유한요소해석으로 응력확대계수를 구하고 이를 이용하여 균열 전파방향을 계산하여 실험치와 비교하였다.

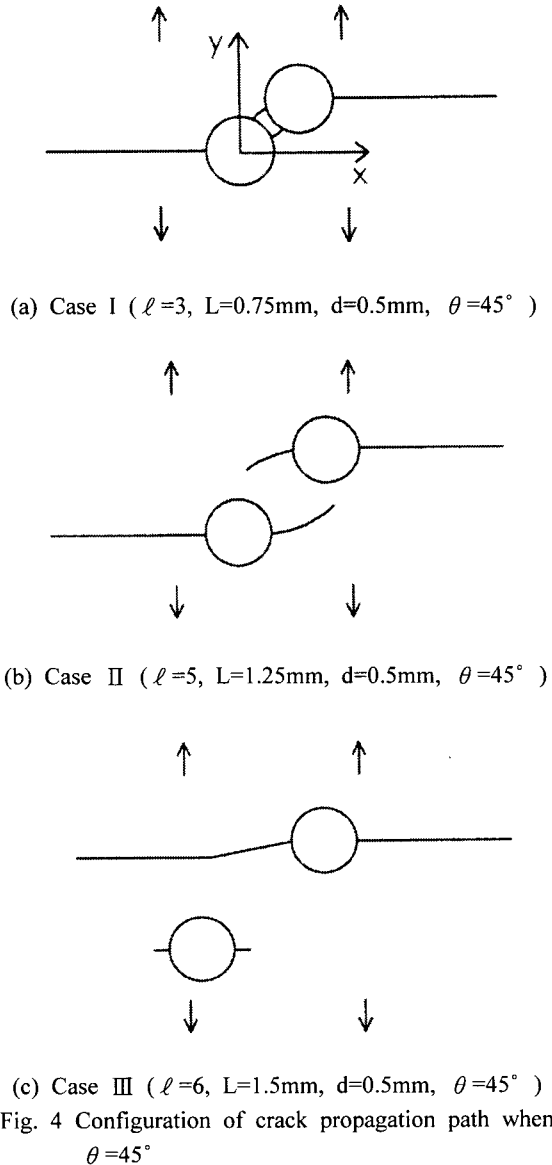


Fig. 4 Configuration of crack propagation path when  $\theta=45^\circ$

시험편에 가공된 미소원공은 관통형태는 아니지만 면외굽힘의 특징상 표면에서 발생하는 하중에 기초하여 2차원 8절점 등매개요소(8 Node Isoparametric element) 유한요소해석을 실시하였다. 기존의 이론 중에서 최대주응력조건<sup>(11)</sup>을 사용하여 균열의 전파 방향을 살펴보았다. Fig. 5와 같이 하중을 받고 있는 요소의 응력상태는 다음 식과 같다. 또한 응력확대계수를 구하기 위하여 특이요

소를 균열선단부에 사용하였으며, 그 값은 NISA의 ENDURE를 이용하여 CTOD의 측정에서 계산되었다.

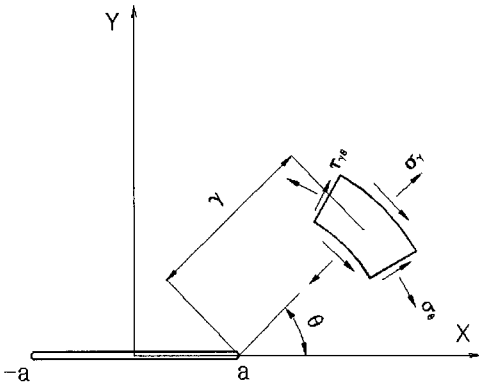


Fig. 5 Stress components near the crack tip in cylindrical coordinates

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \dots\dots (1)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \sin \theta + K_{II}(3 \cos \theta - 1) \right] \dots\dots (2)$$

이 때,  $\sigma_{\theta} = \tau_{r\theta} = 0$  일 때 최대가 되고 이 때 균열의 전파 방향  $\theta$ 는 식 (2)를 0으로 놓음으로써 구할 수 있다.

$$\cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \sin \theta + K_{II}(3 \cos \theta - 1) \right] = 0 \dots\dots (3)$$

원공주위에 최대 상당 응력(Von Mises stress)이 작용하는 위치를 균열발생 위치로 하고, 이 위치에서 약 0.04 mm의 균열을 임의로 진행시켰다. 그리고 유한요소법을 사용하여 이 위치에서의  $K_I$  과  $K_{II}$ 를 구하고 이 값을 식 (3)에 대입하여 균열 전파방향  $\theta$ 를 구하였다. 응력확대계수 계산에는 가상균열진전법을 사용하였다.  $\theta$ 를 구한후 다시 0.04mm 균열을 진전시키고 같은 방법을 되풀이하여 피로균열의 전파 방향을 구하였다. 이 과정을

Fig. 6에 요약하였다.

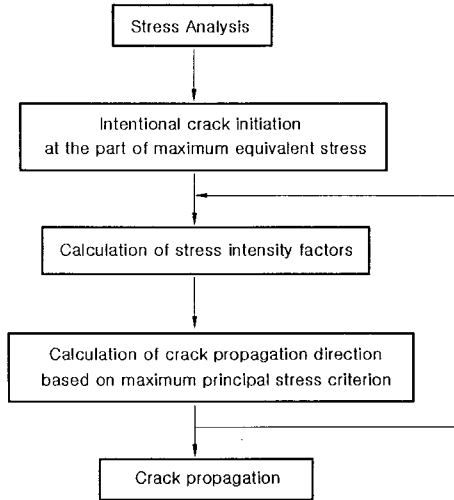


Fig. 6 Flow chart for calculating fatigue crack propagation path

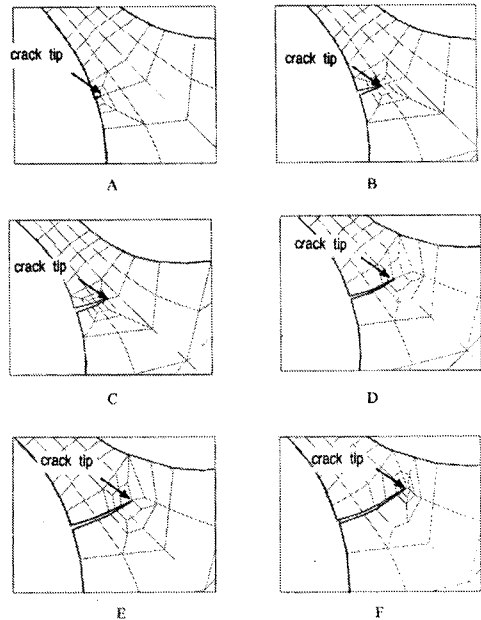


Fig. 7 Examples of crack propagation model in FEM, crack propagates sequently, A-B-C-D-E

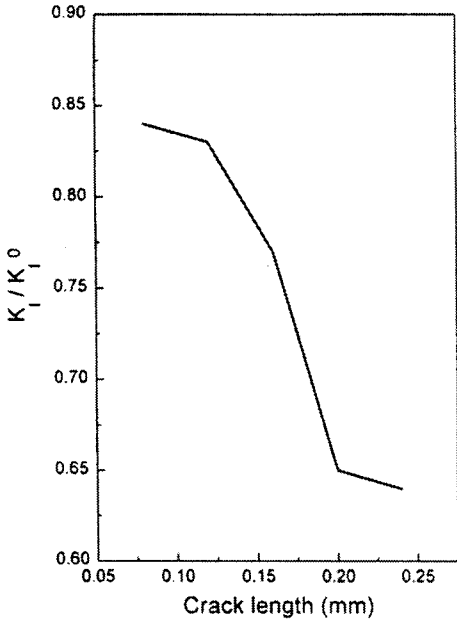


Fig. 8 Mode I stress intensity factor

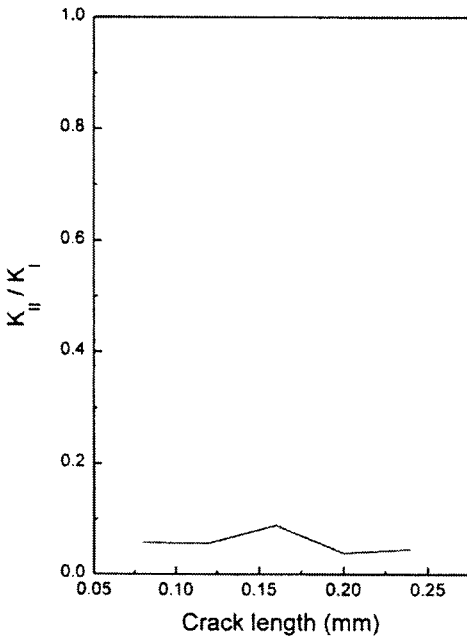


Fig. 9 Mode II stress intensity factor

응력확대계수를 구하기 위한 균열선단의 유한 요소해석 모델을 Fig. 7에 나타내었다. 최대 에너지 해방율을 이용한 방법을 사용하여도 위와 같은 전파 경로를 얻을 수 있다. 균열을 진전시키며 연속적으로 구한 응력확대계수를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸  $K_I/K_I^0$ 은 균열이 진전할수록 감소하고 있다. 따라서 균열 전파속도가 감소하게 된다. 여기서  $K_I^0$ 는 상대편 원공의 간섭을 받지 않는 균열의 응력확대계수를 나타낸다. 즉, 원공이 인접하지 않은 방향에서 성장한 균열의 값이다.  $K_I/K_I^0$ 가 1에 가까울수록 균열이 전파할 때 상대편 균열이나 원공의 간섭을 적게 받는 것을 나타낸다.

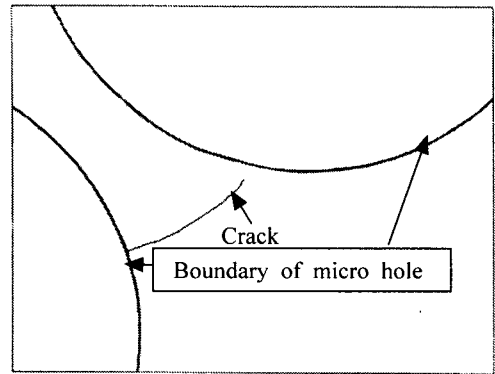


Fig. 10 Crack propagation path obtained by FEM

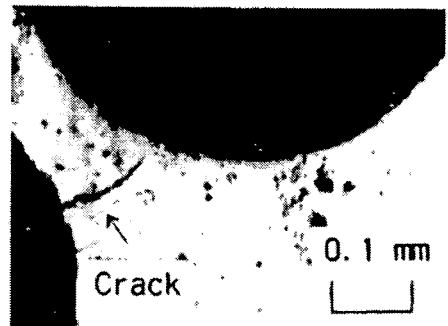


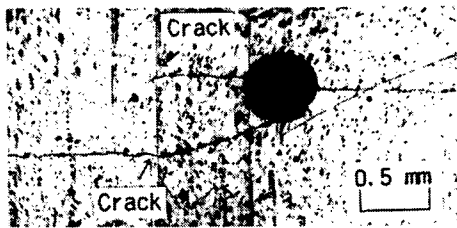
Fig. 11 Crack propagation path experimentally

### 3.3 하중의 변화에 따른 피로균열 전파방향의 변화거동

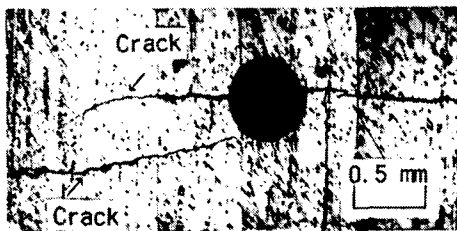
3.2절의 결과는 응력확대계수를 구하여 균열의 전파방향을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 보여준다. 그러나 모든 응력상태에 있어서 피로균열의 전파방향을 최대주응력조건 등으로 예측할 수 있는지는 아직 명확하지 않다.

또한 반복하중하에서의 피로균열 전파방향의 변화를 자세히 고찰하기 위해서는 기존의 단일하중에서의 피로균열전파방향에 관한 이론만으로는 부족하다. 따라서 두 균열이 진전하는 상태하에서 크기가 서로 다른 응력을 작용시켜, 작용응력의 크기에 따라 변화하는 균열전파방향을 살펴보았다.

Fig. 12(a)는  $\sigma_{max}=90\text{MPa}$ 의 응력을 가했을 경우이다. 이 경우 균열은 다른 균열의 영향을 받기 전에 비해 약  $14^\circ$  방향으로 바꾸어 전파한다. 그러나  $\sigma_{max}=120\text{MPa}$ 로 작용응력을 증가시켰을 때에는 평균적으로 약  $18^\circ$  방향으로 바꾸어 균열이 전파한다(Fig. 12(b)). 즉, 작용응력의 크기 차이만으로도 균열의 전파방향이 다소 변화하였다.



(a) When  $\sigma_{max}=90\text{MPa}$

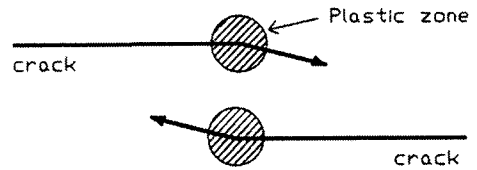


(b) When  $\sigma_{max}=120\text{MPa}$

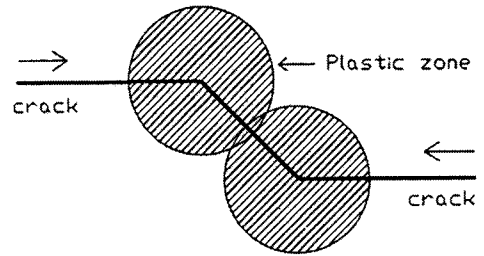
Fig. 12 Crack propagation path under  $\sigma_{max}=90\text{MPa}$  and  $120\text{MPa}$

Forsyth<sup>(12)</sup>는 Fig. 13와 같이 응력확대계수가 충분히 커서 소성역이 겹치면 균열이 합체된다고 하였다. 따라서 소성역은  $K^2$ 에 비례하므로 K가 증가하면 소성역이 커져서 같은 형상을 갖는 두 균

열이 합체될 수도 있고 지나쳐 갈 수도 있다.



(a) Overlap when small stress intensity factor



(b) Coalescence when large stress intensity factor  
Fig. 13 Crack propagation path under two load<sup>(12)</sup>

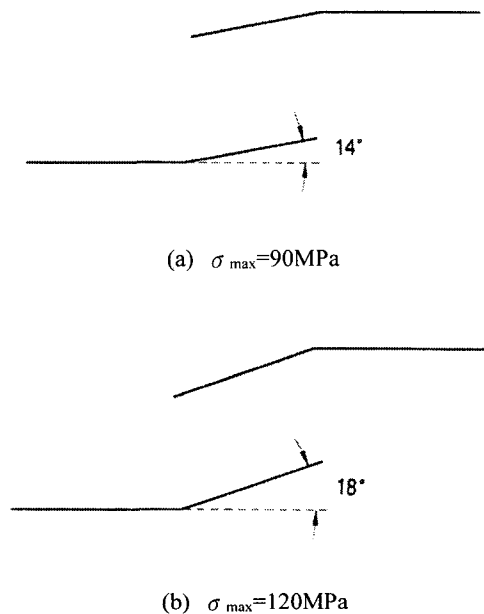


Fig. 14 Simple model of crack propagation path under  $\sigma_{max}=90\text{MPa}$  and  $120\text{MPa}$

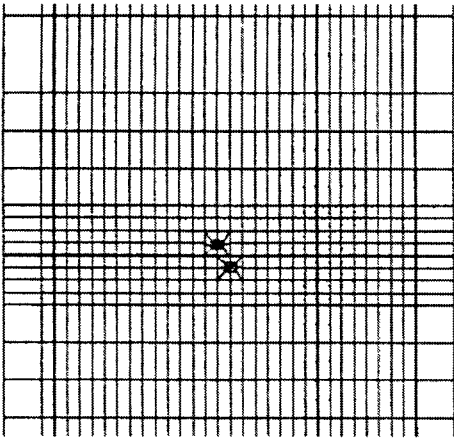


Fig. 15 Finite element model for calculating stress intensity factor

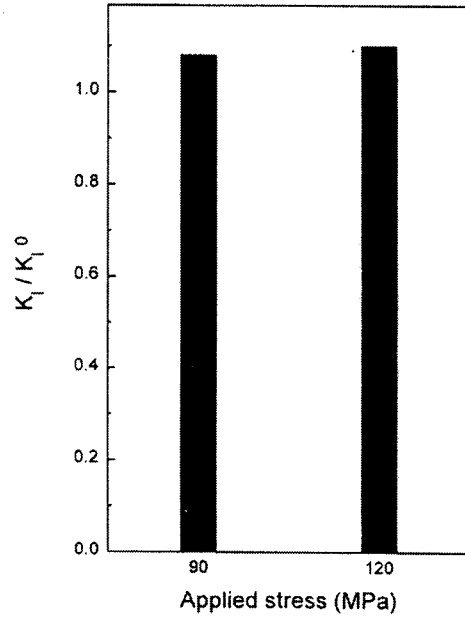


Fig. 17 Mode I stress intensity factor

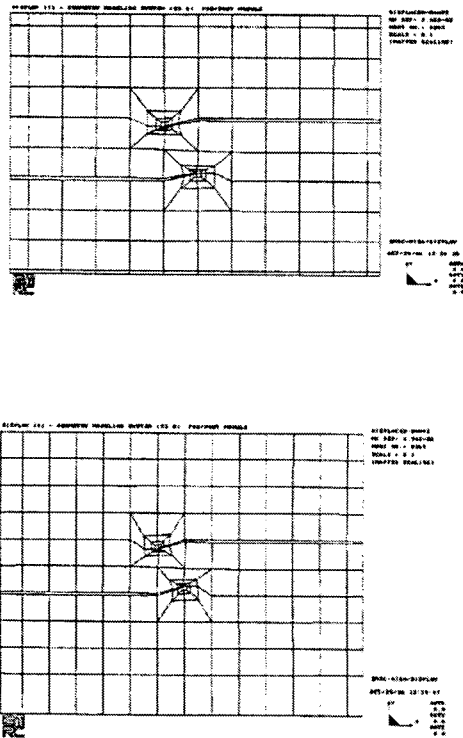


Fig. 16 Crack tip model for prediction of crack propagation direction (when  $\theta = 14^\circ$  and  $18^\circ$ )

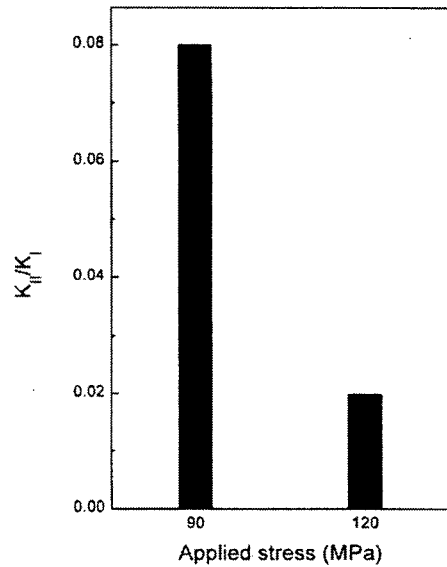


Fig. 18 Mode II stress intensity factor

Fig. 14는 해석을 용이하게 하기 위해 실험에서 관찰한 균열의 전파양상을 단순하게 그린 것이다.



먼저 유한요소법으로 두 가지 경우의 응력확대계수의 차이를 살펴보았다. Fig. 15에는 각 경우의 응력확대계수를 구하기 위하여 사용한 유한요소해석 모델을 나타내었다. 그리고 Fig. 16은 균열부분의 유한요소 모델을 확대해서 나타낸 것이다.

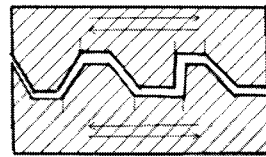
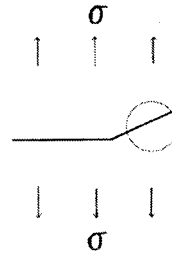
Fig. 17은 응력확대계수  $K_I$ 의 경우를 나타낸다. 여기서  $K_I^0$ 은 균열간의 간섭영향이 없는 상태에서의 응력확대계수이다. 즉, 방향이 변화한 부분의 반대쪽 균열선단의 응력확대계수이다. 모드 I의 응력확대계수  $K_I$ 은 큰 차이가 없음을 볼 수 있다. Fig. 18은 모드 II의 응력확대계수  $K_{II}$ 를 나타낸다. 이 때,  $14^\circ$  방향으로 균열이 전파하는 경우( $\sigma_{max}=90\text{MPa}$ )와  $18^\circ$  방향으로 균열이 전파하는 경우( $\sigma_{max}=120\text{MPa}$ )를 비교하면  $K_{II}$ 는 약 4배의 차이가 난다.

$K_I$ 과  $K_{II}$ 의 비가 변화한 이유로는 유효 응력확대계수 범위( $\Delta K_{eff}$ )가 변화하였기 때문으로 생각된다. 하중을 제거할 때 균열면이 불일치되므로써 나타나는 거칠기 유기 닫힘(Roughness-induced closure) 등이 하중의 상태에 따라 변화하기 때문에 균열선단의  $K_{II}$  및  $K_I$ 을 변화시켰다고 생각된다. Fig. 19에는 균열전파방향에 영향을 미치는 몇 가지 기구에 대하여 설명하였다.

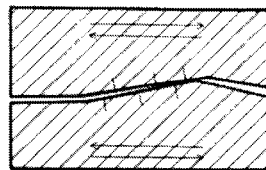
따라서 균열전파방향을 고찰하기 위해서는 추후에 유효 응력확대계수 범위를 자세하게 구하는 것이 필요하다고 생각된다.

### 3.4 미소원공 사이의 거리변화에 따른 피로 균열 전파속도 변화

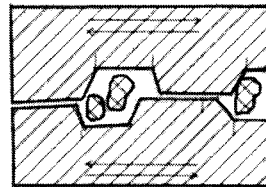
결합간 또는 균열간의 간섭으로 피로균열 전파방향 뿐만 아니라 전파 속도도 변화한다. 피로균열 전파속도의 변화는 재료의 수명에 영향을 미친다. 미소 원공 사이의 각도를  $\theta=45^\circ$ 로 하고, 미소 원공결합 사이의 거리를  $l=3, 5, 6$ 으로 변화시켜 결합간 및 균열간의 간섭 영향에 의한 피로균열 전파속도의 변화를 살펴보았다. Fig. 20은  $l=3, d=0.5, \theta=45^\circ$  일 때 미소원공 바깥부분의 a, d 균열의 전파특성을 나타낸다. Fig. 20에 제시된 a, d 균열은 전반적으로 일정하게 증가한다. 하지만 균열전파 초기에는 짧은 균열의 특성을 보인다. 또한, 균열길이 약  $a=1.5\text{mm}$ 에서 피로균열 전파속도가 다소 둔화되는 이유는 내부 균열의 성장으로 인한 원인이 있는 것으로 생각된다.



Roughness



Friction



Oxide-debris

Fig. 19 Some Mechanism for change of crack propagation direction

Fig. 21은  $l=3, d=0.5, \theta=45^\circ$  일 때 원공 안쪽의 b, c 균열의 전파특성을 나타낸다. b 균열은 초기에는 일정하게 증가하다가 약 균열길이  $a=0.08\text{mm}$ 에서부터 일정한 속도로 전파한다. 그 후 약  $a=0.1\text{mm}$ 부터는 전파속도가 감소하다가 상대편 미소원공으로 합체된다. Fig. 21의 c 균열도 유사한 경향을 나타낸다.

Fig. 22는  $l=3, d=0.5\text{mm}$ 일 때 a, b, c, d 균열의 전파속도를 모두 나타낸 것이다. b, c 균열은 a, d 균열에 비하여 균열 전파속도가 매우 작다. 이는 원공 사이의 간섭영향의 결과라고 생각된다.

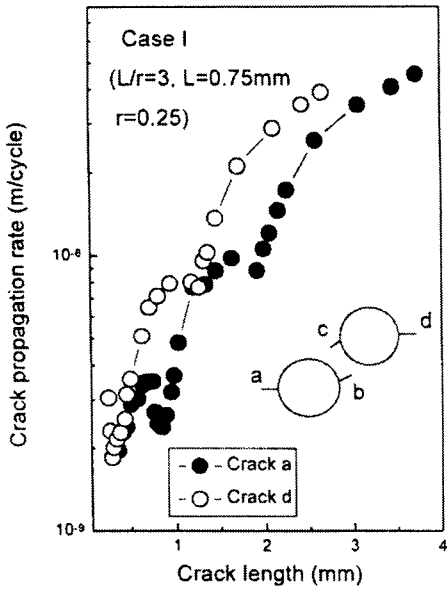


Fig. 20 Relation between crack length and crack propagation rate outside of hole ( $\ell=3$ ,  $d=0.5\text{mm}$ ,  $\theta=45^\circ$ )

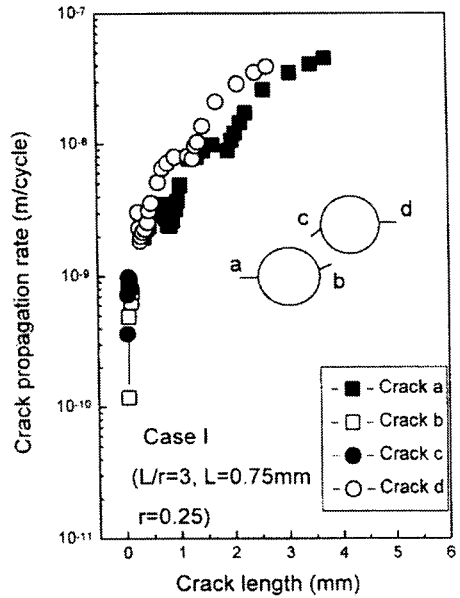


Fig. 22 Relation between crack length and crack propagation rate (Case I,  $\ell=3$ ,  $d=0.5\text{mm}$ )

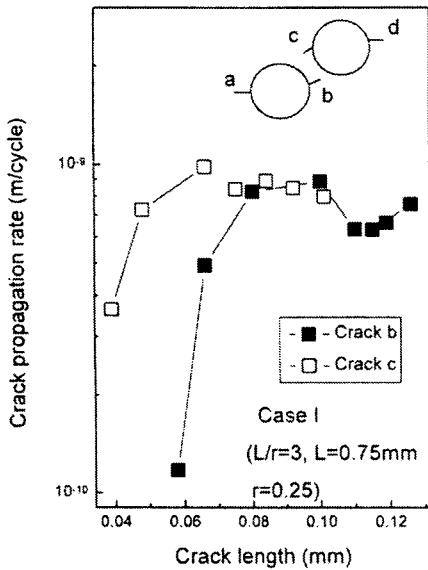


Fig. 21 Relation between crack length and crack propagation rate between two holes (Case I,  $\ell=3$ ,  $d=0.5\text{mm}$ )

이와 같은 경향은 원공 결함사이가  $\ell=5, 6$  으로 변화시켰을 경우도 위와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 미소원공사이에서 발생 전파하는 피로균열은 미소원공 간의 바깥쪽으로 전파하는 경우와 미소원공간의 안쪽으로 전파하는 경우로 나눌 수가 있는데 미소원공이 인접, 원점에 상관없이 항 쌍의 미소원공 바깥쪽의 피로균열전파속도는 어떠한 경우에도 유사하나, 미소원공사이에서 안쪽의 피로균열전파속도는 미소원공사이의 응력의 간섭 정도에 따라서 변화한다. Fig. 23은 미소원공사이의 거리를  $\ell=3, 5, 6$  으로 변화시킨 경우의 실험결과를 나타낸다.  $L=0.75\text{mm}$ ( $\ell=3$ )일 때, 원공 사이의 안쪽의 균열전파속도는 서서히 증가하다가 약  $a=0.08\text{mm}$  지점에서부터 감소하기 시작하고 곧 정지한다.  $L=1.25\text{mm}$ ( $\ell=5$ )일 때는 원공사이의 안쪽의 두개의 균열은 각각 전파속도가 차이를 보여 두 개 균열의 전파속도를 모두 표시하였다. 그 중, 하나의 균열은 전파속도는 비교적 크고 다른 균열의 전파속도는 작다. 그러나 두 균열 모두 균열전파속도는 증가하다가 어느 지점부터 감소하여 마

지막에는 정지한다. 또한  $L=1.5\text{mm}$  ( $\ell=6$ )때의 균열전파속도는 일정하게 증가한다. 이는 상대편 원공 결함의 영향을 거의 받지 않기 때문이라고 생각된다.

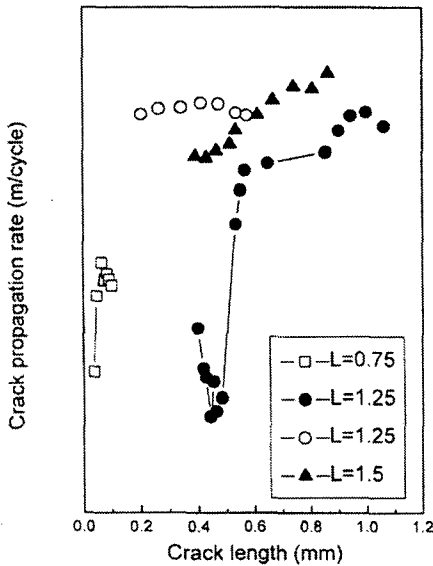


Fig. 23 Relation between crack length and crack propagation rate initiated between two holes ( $\ell=3, 5, 6$ )

#### 4. 결론

본 실험 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 미소 결함간의 위치 및 거리변화에 따라서 피로균열의 간섭정도 및 피로균열의 전파방향이 변화한다.
- 2) 유한요소법을 이용할 경우 결함간에서 발생한 피로균열의 전파방향을 예측한 결과 실험결과와 잘 일치하였다.
- 3) 부하 되는 하중이 변화함에 따라서 피로균열 전파방향은 변화하게 되며 피로균열 전파방향의 변화는 부하하중이 큰 경우가 더 심하다.
- 4) 미소결함간의 위치 및 거리변화에 따라서 피로균열전파속도는 변화하는데, 그 거리가 가까울수록 간섭영향은 많이 받으므로 안쪽의 피

로균열전파속도는 서서히 증가한 후 멈추고, 반면 미소원공간의 거리가 멀어질수록 그들 사이의 간섭영향은 없고 피로균열전파속도는 일정하다.

#### 후기

본 논문은 (1998-001-E00159 자유공모과제) 한국 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으므로 관계제위에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Trantina, G. C. and Barishpolsky, M., "Elastic-Plastic Analysis of Small Defect Void and Inclusion," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 20, No. 1, pp. 1~10, 1984.
2. 송삼홍, 오환섭, "미소원공주위의 피로균열발생 전파거동에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제1권 제2호, pp. 250~258, 1987.
3. 송삼홍, 김진봉, "유한요소해석에 의한 미소원공주위의 응력해석," 대한기계학회 논문집, 제18권 3호, pp. 555~564, 1994.
4. Song, S. H. and Bae, J. S., "Fatigue Crack Initiation and Propagation from Hole," Experimental Mechanics, Vol. 38, No. 3, pp. 161~166, 1998.
5. Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., "Interaction Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, pp. 373~386, 1982.
6. Miyoshi, T. and Tanabe, O., "Stress Intensity Factors for Surface Cracks with Arbitrary Shapes in Plates and Shells," Fracture Mechanics 16th Symposium, ASTM STP868, pp. 512~534, 1985.
7. Chang, R., "On Crack-Crack Interaction and Coalescence in Fatigue," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, No. 5, pp. 683~693, 1982.
8. Sam-Hong Song, Byoung-Ho Choi and Jun-Soo Bae, "Crack Propagation Behavior on the Characteristic of the Interaction Between Two

- Fatigue Cracks," KSME International Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 191-198, 1998.
9. Doquet, V. and Pineau, A., "Multiaxial Low-Cycle Fatigue Behavior of a Mild Steel," Fatigue under Biaxial and Multiaxial Loading,ESIS10, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 81-101, 1991.
  10. 樋口道之助, 川原正言, 近藤潔, 栗原正好, "2次元き裂の進展シミュレーション," 日本造船學會春季講演會において講演, pp. 221-226, 1976.
  11. Erdogan, F. and Sih, G. C., "On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear," Journal of Basic Engineering, No. 85, pp. 519-525, 1963.
  12. Forsyth, P. J. E., "A unified description of micro and macroscopic fatigue crack behavior," International Journal of Fatigue, No. 36, pp. 3-14, 1983.