

# 유한요소법에 의한 결함 주위의 응력분포와 피로크랙의 간섭효과

송삼홍\*, 김진봉\*\*

## Analysis of the stress distribution around flaws and the interaction effects between fatigue cracks by finite element method

S. H. Song\*, J. B. Kim\*\*

### ABSTRACT

In order to analysis of the stress distribution around flaws and the interaction effects between fatigue cracks, stress around micro hole was analyzed by Finite Element Method(F.E.M.) and micro hole specimens were tested using rotary bending fatigue machine and twisting fatigue machine to identify stress effects for fatigue cracks initiating from micro holes and interaction effects between micro holes. The results are as follows : Interaction effects of  $\sigma_y$  for the micro hole side is larger than the large micro hole side when the interval between micro holes is near. Stress concentration factor increase as the diameter of micro hole becomes smaller. But, stress field of micro hole is smaller than that of large micro hole at  $h \leq r$  ( $h$ :depth of micro hole,  $r$ :radius of micro hole) and that of large hole is larger than that of small micro hole at  $h > r$  except the small range from micro hole.

**Key Words** : Interaction Effect(간섭효과), Stress Concentration Factor(응력집중계수), Micro Fatigue Crack(미시피로크랙), Behavior of Stress Distribution(응력분포거동), Stress Distribution around Flaws(결함 주위의 응력분포)

### 1. 서론

재료내에 분포되어 있는 개재물을 포함한 각종 결함들은 그 형태나 크기는 다양하고, 또 분포되어 있는 상태도 인접하거나, 원접하는 등 복잡하다. 이와같이 재료내에 다양하게 분포되어 있는 결함이나 개재물로부터

발생하여 전파하는 크랙들은 이들이 인접하였을 경우에 상호 간섭을 하게 된다.<sup>(1)</sup> 이들 크랙들의 상호 간섭에 관한 연구중 실험적인 방법을 사용하는 경우는 시험편 제작이 어려워 극히 국한된 연구만이 진행되고 있고, 해석적인 방법을 사용하는 경우는 크랙선단의 응력확대 계수만을 비교함으로써 크랙 사이의 간섭 현상을 규명

\* 고려대학교 기계공학과, 정희원

\*\* 고려대학교 대학원

하고 있는 실정이다.<sup>(3)</sup>

한편 표면결합에서 크랙이 발생하여 전파하는 것은 재료의 파괴에 주 요인으로 작용하기 때문에 이에 대한 연구가 다수 보고되고 있다.<sup>(3)(4)</sup> 그런데 이들 표면 결합이나 표면 크랙은 3차원적 형상을 가지고 있기 때문에 이들을 해석하기 위해서는 엄밀하게 3차원적 해법이 요구된다. 그러나 이들 3차원적 형상에 대한 검토는 해의 복잡성으로 인해 형상과 경계 조건이 비교적 단순한 경우에 대한 것이 많고, 일부는 2차원 상태의 것을 단순화 하여 해를 구하기도 한다.<sup>(5)</sup>

결합이나 개재물의 크기가 미소화 되면 이들을 포함한 그 주위의 미소영역에서의 응력분포를 실험적으로 고찰하는 것은 고정밀도의 측정기와 고도의 측정기술이 요구되며 측정부위도 재료의 내부를 제외한 표면에만 국한하여야 하는 문제가 있다. 이와같은 문제의 해석이나 측정에 관련한 방법의 하나로서의 유한 요소해법은 그것들의 형상이나 경계 조건등의 변화에 대한 유연성을 갖고 있어 결합이나 개재물 주위의 응력분포를 해석할수 있는 기법으로서 매우 좋고 이를 토대로 결합이나 개재물에서 발생하여 전파하는 크랙에 대한 파괴역학적 고찰이 가능하다.<sup>(6)</sup>

그런데 미소결합이나 크랙이 인접한 경우, 피로크랙 선단 주위에는 특별한 응력장을 형성하고, 그 결과 크

랙은 빠르게 합체한다는 정성적인 분석은 다수 보고되고 있다. 그러나 피로크랙 선단에서의 피로크랙과 응력분포의 중첩, 크랙의 합체와 간섭등, 여러가지 사항들이 명확하게 규명이 되어있지 않다. 또, 응력집중원으로서의 원공이나 노치등에서 발생한 크랙에<sup>(7)</sup> 대한 응력확대 계수는 2차원 평판문제에서는 원공주위의 응력분포를 쉽게 구할수 있어<sup>(8)</sup> 해석이 용이하나, 3차원 표면 원공에 대해서는 응력분포를 이론적으로 구하는것이 어렵기 때문에 이에 대한 연구 결과는 부족한 실정이다.

이상과 같은 관점에서 본연구에서는 표면에 존재하는 불순물을 포함한 미소결합과 피로크랙발생 전파거동을 토대로, 미소결합 주위에서 발생하는 응력분포와 피로크랙의 상호간섭, 초기결합의 대소와 피로크랙 발생거동 및, 그것들의 상호간섭등을 유한요소법을 이용하여 상세히 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 유한요소법에 의한 해석모델

결합이 존재하는 경우, 이들을 기점으로 발생하여 성장하는 균열의 거동에 미치는 응력의 영향을 해석하기 위하여 해석 모델은 Fig. 1과 같이 단면이 7(mm)×

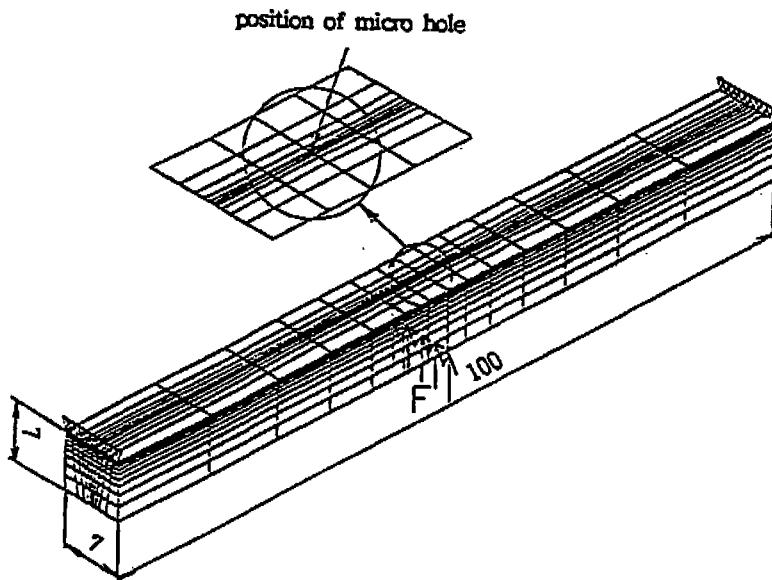


Fig. 1 3D modeling of analysis specimen

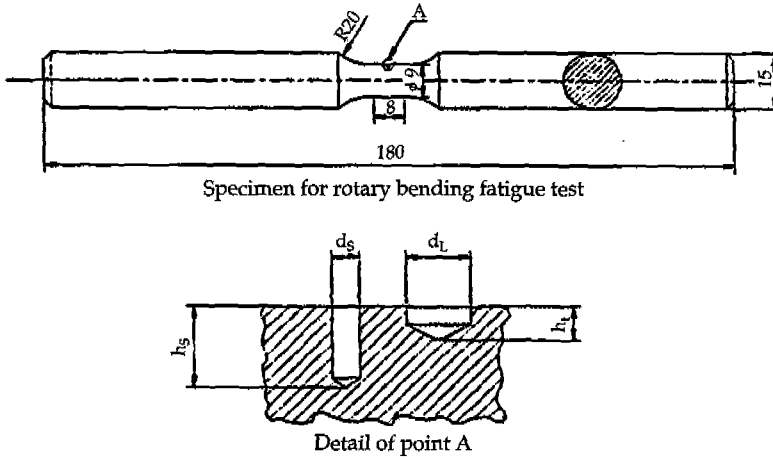


Fig. 2 Illustration of geometry fatigue bending test specimen

7 (mm) 이고 시험편의 길이가 100mm인 사각 단면보의 표면 중앙에 결함이 있는 형태로 하였다. 보의 지지 형태 및 하중 방식은 Fig. 1에서 보는 바와같이 보의 양단이 단순지지되고 하중은 개재물이나 결함이 위치한 반대편에서 가해지는 3점 굽힘 방식이다. 요소 분할시 사각보 중앙에 개재물이나 결함이 있어 이들을 중심으로 전체 형상에 대칭이 됨으로 이들을 포함한 보 전체를 이등분하여 해석하였으며 결함의 형상은 원통형으로 하였다.

### 2.2 실제 실험을 위한 시험편 가공 및 관찰 기법

실제로 미소결함을 갖는 시험편의 모양과 치수는 Fig. 2와 같으며 시험편 표면에 가공된 미소 결함으로부터 피로크랙 발생 전과거동을 상세히 관찰하기 위하여, 시험편 표면은 전해연마를 실시하여 거울면으로 연마하여 사용하였다.

또, 표면크랙길이는 연속적으로 촬영, 측정하였는데 시험편을 시험기에서 분리하지 않고 이동 현미경을 실험기에 설치하고, 집안이동 축미계를 사용하여 연속적으로 측정하였다. 이때 피로크랙의 길이는 전체 표면의 피로크랙길이에 미소결함을 포함한것을 사용하였다. 그 이유는 크랙이 노치효과를 무시할수 있을 정도로 전파한 후에는, 노치부도 크랙의 일부로 간주될수 있기 때문이다. 본 실험에 사용한 실험기는 Ono type 회전굽

힘 피로시험기(회전수 3000rpm)이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 미소결함이 하나인 경우의 피로크랙 거동

Fig. 3은 미소 결함 지름이 일정하고 그 깊이를 변화시켜 가면서 조사한 피로크랙의 성장특성을<sup>(9)</sup> 조사한 일례이다. Fig. 3중의 (a)는 깊이  $h_s$  및 지름  $d_s$ 의 비가  $h_s/d_s=1$ 인 경우이고, (b)는  $h_s/d_s=2$ , (c)는  $h_s/d_s=4$ 인 경우인데 피로크랙길이는  $N=1.25 \times 10^5$ 에서 각각 차이가 있음을 관찰할 수 있다.

이상과 같은 결과는 미소 원공지름이 각각 다른 경우에도 동일하게 관찰된다. 이와 같은 특성이 나타나는 이유에 대해서는 아직 확실하지 않으나 미소원공주위에 발생한 크랙이 그 크랙 주위에 형성되어 있는 금속조직의 특수성,<sup>(10)</sup> 노치효과,<sup>(11)</sup> 응력의존도,<sup>(12)</sup> 결함형태의 특수성<sup>(13)~(15)</sup> 등 여러가지 인자들이 복합적으로 기여한다고 생각된다. 이점에 대해서는 후후 구체적인 검토가 필요하다고 생각된다.

### 3.2 미소결함이 2개인 경우의 피로크랙 거동

Fig. 4는 미소원공 2개가 인접한 경우의 피로크랙 발생전과 거동의 일례이다.

미소원공주위에 발생하는 피로크랙은 상호 간섭효과

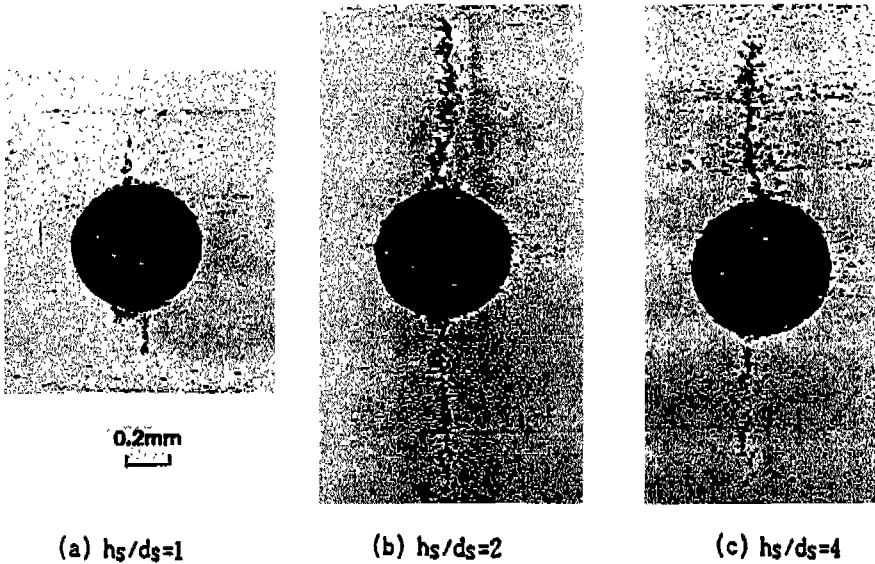


Fig. 3 Crack propagation state at one hole specimen  $d_s = 0.5\text{mm}$ ,  $N = 1.25 \times 10^6$

를 일으켜, 그 후의 응력반복수의 증가에 따라 서로 합체하면서 전파한다. 따라서 미소원공 주위에 발생하는 응력장은 중첩이 일어남을 예측할 수 있다. 또 현미경 관찰을 토대로 피코크랙은 미소원공의 주위에 최대응력이 작용하는 점에서만 발생하는 것이 아니고 그 점을 중심으로 좌우에 우선 슬립들을 발생시킨후, 그것들은 그후의 응력사이클에 따라서 슬립이 커지거나 슬립밴드를 형성하고 그 속에서 미시크랙이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다.

### 3-3. 유한요소법에 의한 미소결합 주위의 응력분포

종래의 연구자들은<sup>(16)(17)</sup> 3차원 형상에 대해서는 해의 복잡성으로 인하여 정확한 해를 구하기가 어렵지만 엄격해에 접근하는 방법의 하나로, 2차원 미소원공에 대한 응력해의 기본 방법을 3차원 미소원공의 응력해를 구하는데 사용하고 있다. 이와같은 관점에서 본 실험에서도 드릴의 선단각도가  $118^\circ$ 인 경우로 가정된 미소원공결합 주위의 응력분포를 구하였다.

Fig. 5는  $r=25\mu\text{m}$ 인 미소원공 주위의  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$  분포를 나타낸 것으로서, Fig. 5(a)는 미소원공 상부표면( $Z=0$ )에서  $1 \leq \frac{x}{r} \leq 5$ 와  $0 \leq \frac{y}{r} \leq 4.5$ 인 범위에서  $\frac{h}{r} = 2$ 인

경우의  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$  분포를 나타낸 것으로  $y=0$ 인  $x$ 축 상의  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$ 가  $\frac{x}{r}=1$ 인  $y$ 축 상의  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$ 보다 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 미소원공을 기점으로 균열이 발생하여 전파하는 경우에 균열의 진행방향으로 예상되는  $y=z=0$ 인  $x$ 축상의  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$ 의 분포를 나타낸 것이다.

3차원 원공의 경우  $h/r$ 가 증가하면  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$ 가 증가하고  $1.4 < \frac{x}{r} \leq 1.8$  범위에서  $\frac{\sigma_x}{\sigma_0}$ 가 최대가된다.

한편 미소원공 상부표면에서 미소 원공주위의 후프응력은  $\theta < 60^\circ$ 인 범위에서는 3차원 표면결합의 경우가 대부분 2차원 미소 원공주위의 후프응력보다 작고,  $\theta > 60^\circ$ 인 범위에서는 3차원 미소원공인 경우가 2차원 미소 원공주위의 후프응력보다 크게됨을 알 수 있다.

2차원 미소원공인 경우,  $\theta = 60^\circ$ 인 경우에 후프응력이 0이 되는 응력특이점이 존재하게된다. 한편 3차원 결합인 경우에도 이와같이 후프응력  $\sigma_\theta/\sigma_0 = 0$ 가 되는 특이점은 본 연구에서는  $\theta > 60^\circ$ 인 점에서 존재하는 것으로 해석되었다. 그리고  $h/r$ 가 변할 경우에  $\sigma_\theta/\sigma_0$ 의 변화는  $\theta < 60^\circ$ 인 경우  $h/r$ 가 증가하면  $\sigma_\theta/\sigma_0$ 도 증가하게 되나

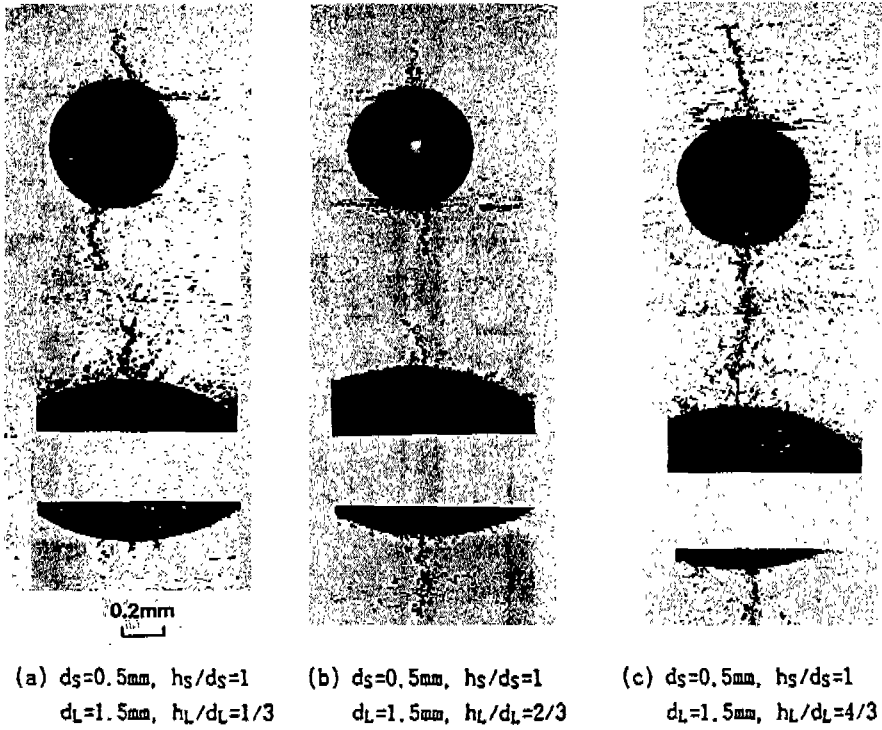
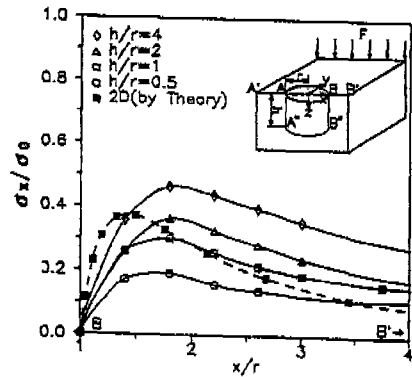
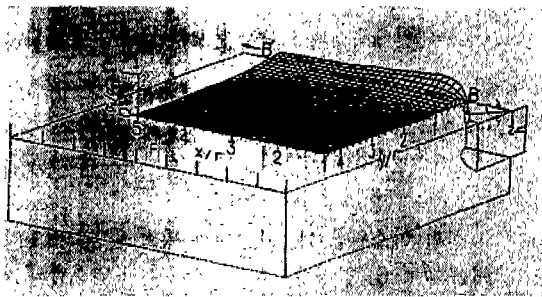


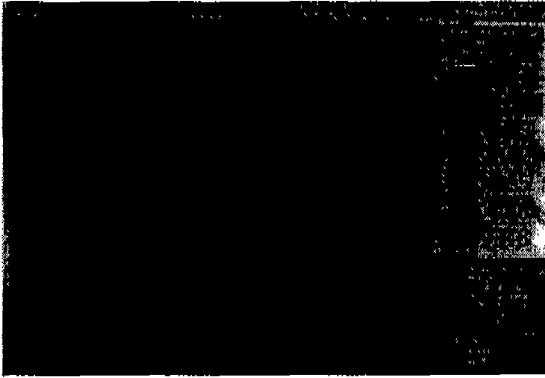
Fig. 4 Crack propagation state at two holes specimen  $L = 2\text{mm}$ ,  $N = 7.5 \times 10^4$



(a) Distribution of  $\sigma_x/\sigma_0$  on the upper surface of a hole ( $h/r = 2$ )

(b) Distribution of  $\sigma_x/\sigma_0$  along the x axis A-A' or B-B'

Fig. 5 Distribution of  $\sigma_x/\sigma_0$  around a hole



e=2

Fig. 6 Distribution of  $\sigma_y/\sigma_0$  around micro holes with variation of the interval  $e(e = s/r = 2, h/r = 2)$

$\theta > 60^\circ$ 에서는 이와는 반대로  $h/r$ 의 증가에 따라  $\sigma_\theta/\sigma_0$ 는 감소하게 된다.

그러나 이와같이 작은 결함에서의 응력간섭이 큰 결함의 그것보다 크게 되는 현상은 항상 성립되는 것이 아니라 그것은 미소원공의 깊이와 직경의 차이에 따라서 독립된 응력의 크기나 기울기가 차이가 나게 되고 미소원공 선단으로 부터의 거리에 따라서도 이들값의 대소가 변하게 됨으로 해석을 요하는 각 형상에 대한 독립적인 응력분포를 구하여 이를 판별하여야 할 것이다.

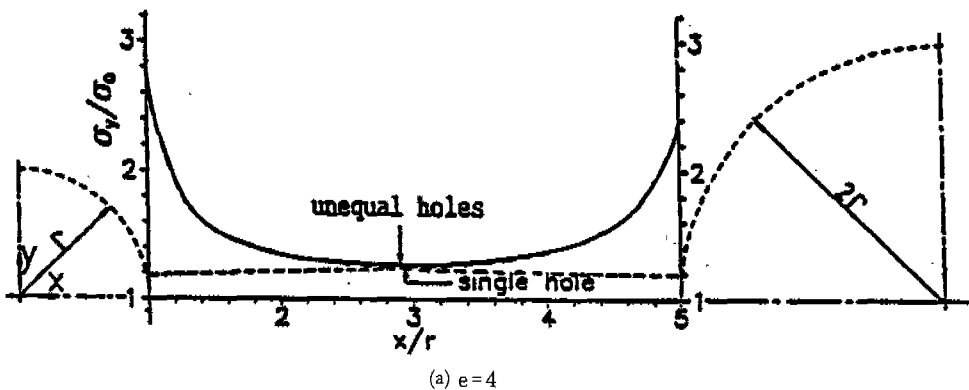
3.4. 유한요소법에 의한 미소원공 간의 응력의 간섭 피로 균열 발생 거동에 대한 결함의 응력간섭은 결함

선단에 인접하여 존재하는 다른 결함과의 중심간 거리의 비에 따라서 각각의 결함은 응력장의 독립성을 유지하기도 하고 응력장의 중첩으로 인하여 특이한 응력장을 형성하기도 한다. 이와같이 결함사이의 응력의 간섭효과에 의하여 특이한 응력장이 형성될 경우 피로 균열의 발생영역, 발생빈도 및 전파시기는 이에 영향을 받는다.

Fig. 6은 미소원공 사이의 간격이 변할 경우에 미소원공 주위의  $\sigma_y/\sigma_0$ 의 응력분포를 유한요소법에 의하여 해석한 것으로서, 그 해석 모델은 전체형상의 1/4부분만을 나타낸 것이다.

그 결과 미소 원공간 간격이 원점에서 인접상태로 변화함에 따라서 미소 원공간의 응력분포는 간섭하게 되고,  $\sigma_y/\sigma_0$ 의 응력간섭효과는 미소원공 주위의 내부보다는 표면에서 더 크게 된다.

아울러 Fig. 7에 나타난 응력분포는 인접 미소원공이 표면에 나타나는 응력 분포만을 비교하므로써 미소원공 사이의 응력의 간섭 영향을 고찰할 수 있다. 또, 미소원공 깊이가  $h/r = 2$ 이고, 지름의 비가 1:2로 크기가 다른 미소원공 사이의 미소원공 상부 표면의 응력분포를 조사한 결과,  $y = 0$ 인  $x$ 축상의 응력분포는 큰 결함측의  $\sigma_y/\sigma_0$ 의 크기가 작은 결함측의 그것보다 작지만 그 기울기는 완만하며  $y$ 방향으로의  $\sigma_y/\sigma_0$ 의 기울기도 큰 결함측의 것이 작은결함의 그것보다 완만하다는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 Fig. 9는 깊이가  $h/r=2$ 로 동일하고 직경의 비가 1:2로 크기가 다른 미소원공 사이의  $\sigma_y$ 의 간섭을 구한 결과이다. 미소원공 간격  $e=4$ 일 경우에도 이 두 미소원공사이의 중앙부인  $x/r=3$  주



(a) e = 4

Fig. 7 Comparison of  $\sigma_y/\sigma_0$  between unequal micro holes and single micro hole( $h/r = 2, e = s/r$ )

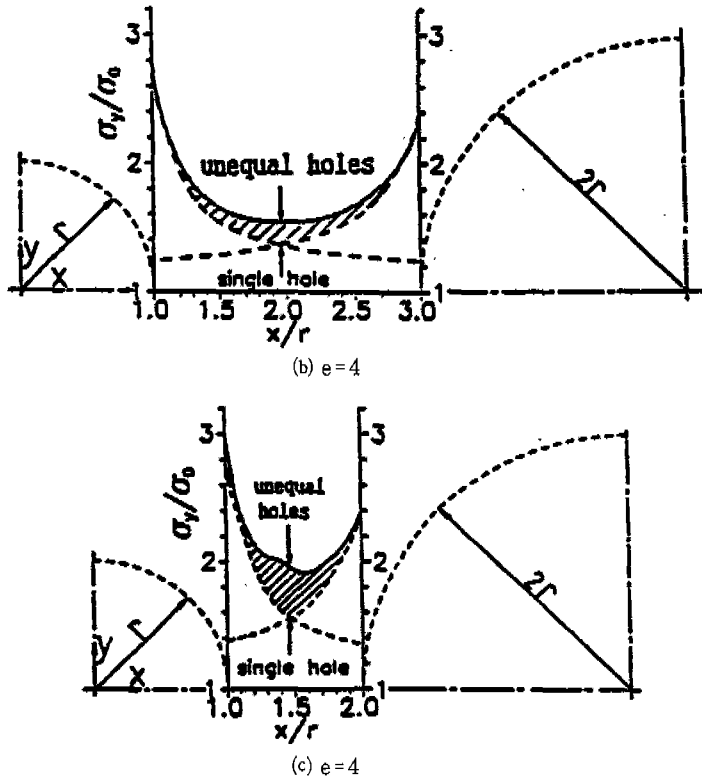


Fig. 7 Comparison of  $\sigma_y/\sigma_0$  between unequal micro holes and single micro hole ( $h/r = 2, e = s/r$ )

위의 일부분만  $\sigma_y$ 의 간섭이 있고 그 이외의 부분은 간섭이 없게 된다.

그리고  $e=2$  일때는  $1 \leq x/r \leq 2.8$ 인 범위에서  $\sigma_y$ 의 간섭이 있으며  $e=1$ 인 경우에는 미소원공사이의 전 범위에서  $\sigma_y$ 의 간섭이 있게 된다. 아울러  $\sigma_y$ 의 간섭영향은 큰 결함측 보다는 작은 결함측에서 다소 크게 나타나게 됨을 관찰할 수 있었다.

#### 4. 결 론

결함이 재료 표면에 존재할 경우 그 결함으로 부터 발생하는 피로크랙의 거동과 응력분포 거동을 상호 관련시켜 그 영향을 고찰하였다. 연구방법으로서는 피로크랙의 발생, 전과형태를 직접 관찰하였으며 응력해석에는 유한요소법을 사용하였다. 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 미소원공이 하나인 경우, 원공의 크기와 상관없

이  $h/d$ 가 증가함에 따라서 피로크랙 발생초기의 크랙 전파속도는 빨라지며, 크랙 발생후 노치효과로 나타나는 지연기간은 길어진다.

(2) 미소원공 사이에서 발생하는 피로 크랙은 미소원공이 인접한 경우는 서로 간섭을 일으킨다.

(3) 미소원공이 2개인 경우, 응력의 간섭 영향은 미소원공간의 거리가 근접할수록 크며, 그 거리가 원접할수록 작아는데, 어떤 한계 거리를 기준으로 응력의 간섭 영향은 없어진다.

(4) 미소원공간의 응력의 간섭은 크기가 다른 결함 사이에서는 작은 결함쪽에서 크게 나타난다.

(5) 미소원공 지름이 변하는 경우, 응력집중은 작은 원공쪽이 크지만 응력장은 구멍깊이  $h$ 와 구멍 반지름  $r$ 의 관계에서  $h \leq r$ 인 범위에서는 작은원공쪽이 크고,  $h > r$ 인 범위에서는 비교적 원공에서 근접한 일부 영역을 제외하고는 큰 원공쪽이 크다.

(6) 미소 원공사이에서  $\sigma_y$ 의 응력 간섭이 없는 범위

는 다음과 같다.  $h/r=1$ 인 경우 크랙간의 간격  $e$ 는 원공 크기의 차이에 무관하게 1 이상이고,  $h/r=2$ 인 경우, 동일 크기의 원공에서는  $e \geq 2$ 이며 다른 원공이 있을 경우는  $e \geq 3$  이다.

### 후 기

본 연구는 1992년도 한국과학재단 일반목적기초 연구비 지원 (과제번호:921-0900-018-2)에 의한 것입니다. 관계 제위께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 송삼홍, 오환섭, "표면 결함에서 발생하는 피로크랙 거동", 대한기계학회논문집, 제9권, 제2호, pp.150-157, 1985,
- 2.村上敬宣, 外2人, "マルエ-シツク鋼の疲勞強度に及ぼす微小缺陷と介在物の影響", 日本機械學會論文集(A), 第53卷, 第492號, pp.1482-1492, 1987.
3. 宋森弘, 國尾武, "高硬度鋼のミクロ領域における疲勞き裂生成過程", 日本機械學會論文集, 第40권, 第334號, pp.1503-1510, 1975.
4. 平修二 外2人, "焼入焼もどし炭素鋼の疲勞破壊に関する研究", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第312號, pp.3059-3066, 1972.
5. 齋藤, 中原, "半球ピットを有する伴無限體の軸引張り", 日本機械學會論文集, 第33卷, 第247號, pp.343-350, 1967.
6. 송삼홍, 오환섭, "미소원공주위의 피로크랙 발생 전과거동에 관한 연구", 한국해양학회지, 제1권, 제2호, pp.250-258, 1987.
7. 송삼홍, 윤명진, "프리크랙과 미소원공제의 크랙성장 하한계 조건에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp.278-295, 1988.
8. Y.Murakami and S.Nemat, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws

- under Tension and Bending", Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.3, pp.373-386, 1982.
9. 國尾武, 宋森弘, "低炭素martensite組織の疲勞強度に舊結晶粒度の影響", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第324號, pp.143-152, 1973.
10. S. H. Song, T. Kunio, "Fatigue Crack Formation at High Hardness Steels", Proc. 1st. Int. Conf. Mech. Behavior of Materials, Kyoto, Japan, Vol.II, pp.143-152, 1972.
11. 송지호, 파괴역학의 현황(I), 대한기계학회지, Vol.20, No.6, pp.449, 1980.
12. T.Jujita, "Stress Concentration due to Hemi-prolate Spheroidal pit at a Free Surface of a Semi-Infinite Body under All-around Tension". Bulletin of the JSME; Vol.23, No.181, pp.1048-1054, 1980.
13. 송삼홍, "열처리 강재의 피로 거동에 관한 연구", 대한기계학회지, 제15권, 제3호, pp.275-280, 1975.
14. 西谷, "電解研磨した横穴材の回轉曲げ疲勞に関する研究", 日本機械學會論文集, 第39卷, 第323號, pp.2005-2012, 1966.
15. 송삼홍, 원시태, "과대과소응력하에서의 피로크랙 발생 전과 거동(I)", 대한기계학회논문집, 제9권, 제3호, pp.301-308, 1985.
16. B. J. Heath, A. F. Grant, "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.
17. R. Keinzler, On the Distribution of Hoop Stress around Circular Holes in Elastic Sheets", Trans. ASME, Vol.54, pp.110-118, 1987.