

(論 文)

유한 요소법에 의한 미소 원공 주위의 응력 분포에 대한 3차원 해석

송삼홍* · 김진봉**

(1990년 3월 11일 접수)

3-D Analysis of Stress Distribut on Around Micro Hole by F.E.M.

Sam Hong Song and Jin Bong Kim

Key Words : 3-Dimensional Finite Element Analysis(3차원 유한 요소 해석), Stress Concentration Factor(응력 집중계수), Relative Stress Distribution(상대응력분포), Non Dimensional Sress Intensity Factor(무차원 응력 확대 계수) , Interaction(간섭)

Abstract

This study has been made to investigate the relation between surface crack behavior and stress distribution around micro hole. Stress distribution around micro hole was analyzed by 3-D F.E. M. and surface crack behavior was analyzed by stress distribution and stress intensity factor. Obtained results are as follows; (1) Stress magnitude becomes large as the depth becomes deeper and stress magnitude of the 3D problem along the crack direction is larger than that of 2D problem but stress distribution is almost same with the 2D problem for the case that $h/r \geq 2$. (2) Transition point from tension to compression about the boundary of the hole for the 3D problem is $50^\circ < \theta < 60^\circ$ depending on the depth. (3) Fracture mechanical analysis can be applied for the crack initiated from flaws and stress concentrators by relative stress distribution. (4) The interval which effects stress distribution between holes becomes large as the depth becomes deeper.

1. 서 론

기계 구조물이나 부품의 사용중에 발생하는 균열 들은 재료가 갖는 기지(基地)의 경도가 높을 경우 ($Hv \geq 500$)에는 부재중에 산재하여 있는 결함이나 비금속 개재물에서 발생하여⁽¹⁾ 상호 간섭하면서 성장하여 최종 파단을 주도하는 주 균열에 합체하게 된다. 이와 같이 산재된 결함이나 비금속 개재물 들은 형태, 크기 및 위치 등에 따라서 피로 강도, 피로 균열의 발생 및 전파 등의 거동에 미치는 영향

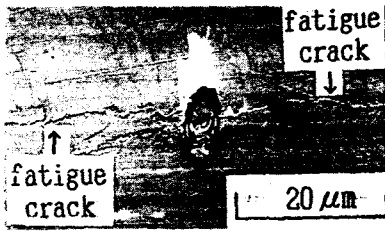
은 다양하고 복잡하다⁽²⁾.

그리고 재료가 갖는 기지(基地)의 경도가 낮을수록 ($Hv \leq 400$) 결함이나 비금속 개재물은 피로균열 발생원이 되기도 하나⁽³⁾, 대개는 피로 균열 발생과 관계가 없고 그대신 기지(基地)의 연(軟)한 조직 자체가 피로 균열 발생원이 된다⁽⁴⁾. 특히 재료가 갖는 기지(基地)의 경도가 더욱 낮을 경우 ($Hv \leq 200$)에는 결함이나 비금속 개재물은 피로 균열 발생과는 관계가 없고 대부분 재료의 연(軟)한 조직 내에서 피로 균열은 발생하여 전파한다⁽⁵⁾.

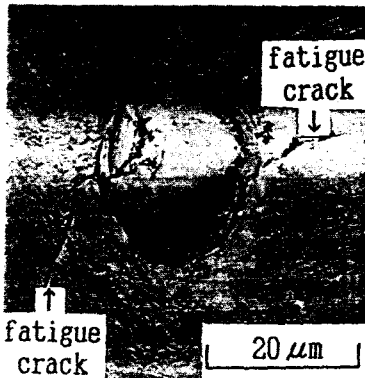
이와 같이 결함이나 비금속 개재물은 재료가 갖는 기지(基地)의 경도의 대소에 따라 피로 균열의 발생 및 전파 등의 거동에 미치는 영향은 일정하지

*정 회원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

**정 회원, 고려대학교 대학원(현 한국전기연구소)



$\sigma=1.176\text{GPa}$ $N=1.9\times 10^4$
(inclusion size= $4\mu\text{m}$)
(a) small inclusion



$\sigma=1.176\text{GPa}$ $N=1.9\times 10^4$
(inclusion size= $20\mu\text{m}$)
(b) large inclusion

Fig. 1 Crack propagation from a inclusion⁽¹⁾

않으나 Fig.1에서와 같이 비금속 개재물이나 결함이 피로 균열 발생원이 되는 경우에는 경도의 대소에 관계없이 이들을 포함한 국부 영역이 응력 집중원이 된다^(4,6,7).

이상에서와 같이 응력 집중원이 될 수 있는 자연 결함이나 비금속 개재물은 그 크기가 피로 강도의 크기를 좌우할 것이 예상되나 이러한 크기를 야금학적으로 제어한 시험편을 제작한다는 것은 상당한 시간과 노력이 요구되어 이를 대신할 수 있는 인공 결함으로서 인공 미소 원공 등을 갖는 재료에 대한 연구가 다수 보고되고 있다⁽⁶⁻¹⁰⁾. 한편 이들 결함이나 비금속 개재물이 재료 내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고, 분포되어 있는 상태도 인접하거나 원접하는 등 다양하다. 이와 같이 다양하게 분포된 결함이나 균열들 사이에서 일어나는 피로 균열의 발생, 전파 거동을 조사한 연구도 다수 보고되고 있다.

이에 대한 대표적 연구로서 송 등^(6,7,11)은 회전

굽힘 시험을 실행하여 동일 크기의 미소 원공이 2개가 인접하여 존재하는 경우, 그것의 대소에 관계없이 미소 원공의 선단에서는 원공 각각의 응력장의 간섭에 의하여 특이 응력장을 형성하여 피로 균열은 서로 빠른 속도로 합체하며 이때 각 응력장이 간섭할 수 있는 범위는 미소 원공의 중심간 거리를 $2L$, 원공 반경을 r 이라고 할 때 $L \leq 3r/2$ 이라고 하였고, Murakami 등⁽¹²⁾은 체적력법 (body force method)를 이용하여 근사적으로 무한체의 표면에 인접하여 존재하는 반타원 균열에 대한 응력 확대 계수는 급격하게 증가한다고 보고하고, 이를 균열 상호간의 간섭에 의한 것으로 간주하여 이 범위는 작은 균열의 장 반경을 r_1 , 큰 균열의 장 반경을 r_2 라고 하고 중심간 간격을 $2L$ 이라 할 때 $L \leq (2r_1 + r_2) / 2$ 라고 하였다.

한편 Heath⁽¹³⁾ 등은 hole 내의 동일 크기의 모서리 타원균열에 대해 수치 해석을 이용하여 응력 확대 계수를 구함으로써 균열 간의 상호 간섭 영향을 미치는 범위를 구하여 타원 균열의 크기에 따라 상호 간섭을 일으키는 범위는 $L \leq (2.5r - 3r) / 2$ 이라고 보고하였다.

이상은 3차원 표면 결함에서 발생한 균열들의 상호 간섭에 관한 연구 결과들로서 2차원 관통 균열에 관한 연구들과 비교한 결과는 다음과 같다.

Arai⁽¹³⁾ 등은 A533B. cl.1 강을 이용하여 크기가 다른 표면 균열사이의 상호 간섭 효과를 실험한 후 石田이 계산한 2차원 관통 균열에서의 간섭효과와 거의 같다고 하였고, Murakami⁽²⁾ 등은 표면 균열들이 어느 정도 깊이 이상일 경우 무한 평판에서의 2차원 관통 균열에서의 간섭 효과와 같다고 보고하였다. 아울러 西谷⁽⁵⁾은 무한 평판에서의 2차원 관통 타원 균열과 무한체에서의 표면 타원 균열 사이의 간섭 효과를 구하여 타원 장 반경을 r 균열 중심 간격을 $2L$ 이라고 할 때 $\lambda = r / 2L$ 로 표시하였을 경우 $\lambda \ll 1$ 일 경우 간섭 효과는 관통 균열에서 λ^2 에 비례하고 표면 균열에서는 λ^3 에 비례한다고 하였다.

이상의 몇가지 결과를 검토하면 실제 사용하고 있는 부재중에 산재해 있는 미소 결함을 포함한 균열사이의 간섭을 일으키는 범위는 표면 균열의 경우 깊이에 따라 변화하고 2차원 관통 균열에서의 간섭 영향을 일으키는 범위와는 다를것으로 예상되나, 연구결과에 따라 다소 차이가 있어 표면 균열의 깊이 변화와 간섭 영향에 대한 관계를 명확하게

규명하는 것은 이 계통의 연구를 발전시켜 나가는 데 매우 중요한 과제라고 생각된다.

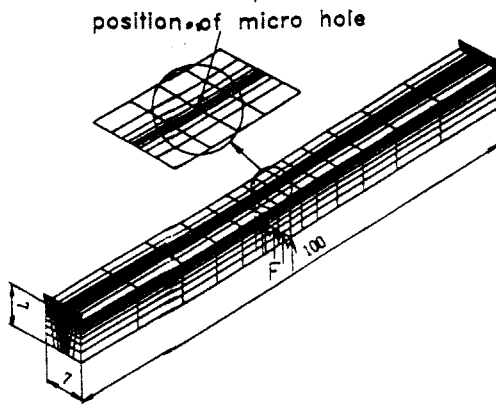
이와 같은 관점에서 본 연구는 미소 결함주위에서 발생, 전파하는 균열들에 미치는 초기 결함 깊이와 상호 간섭 영향을 검토하기 위하여 기존 재료가 갖고 있는 결함이나 비금속 개재물로 대신할 수 있다고 생각되는 미소 원공의 크기를 변화시킨 모델에 대해 유한 요소법을 이용하여 3차원적으로 응력을 해석하였다. 실제 사용하고 있는 부재에 결함들이 존재할 경우 응력장의 간섭으로 피로 균열 진전이 가속화됨으로 미소 원공 주위의 응력 분포 및 미소 원공사이의 응력장의 간섭과 미소 원공에서 발생, 전파하는 표면 균열의 응력 확대 계수에 미

치는 영향에 대하여 비교검토 하였다.

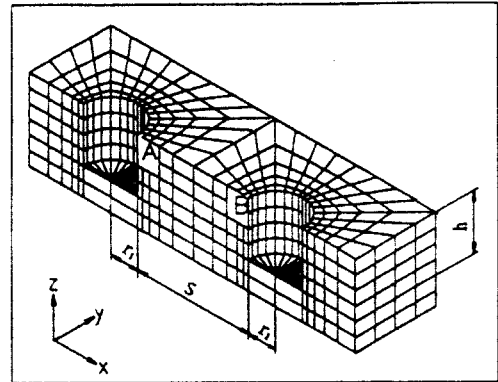
2. 유한 요소 모델 및 해석 방법

굽힘 하중을 받는 양단 지지 사각보의 중앙에 미소 결함이 존재할 경우, 그 주위에 분포되는 응력의 분포가 미소 결함에서 발생 전파하는 표면 균열 거동에 미치는 영향을 해석하기 위하여 미소 결함으로 미소 원공을 해석 모델로 선정하였다.

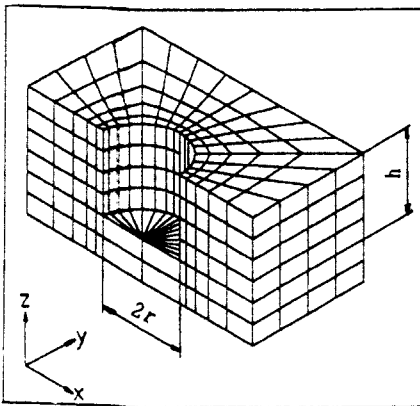
Fig. 2(a)는 굽힘 하중을 받는 사각보의 중앙에 미소 원공이 있는 경우를 나타낸 것으로 보 전체에 비해 원공의 크기가 매우 작음으로 미소 원공이 있는 부위를 확대하여 미소 원공 형태에 따라 대표적



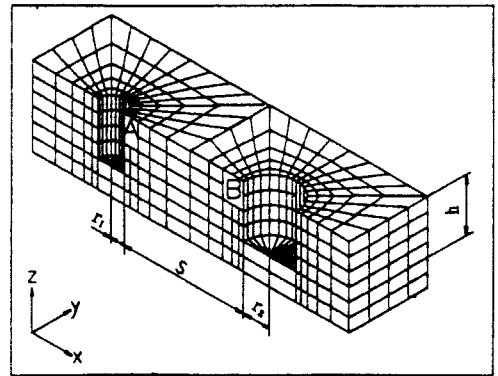
(a) 3D Modeling of analysis specimen



(c) Mesh generation of twin micro holes ($r=0.025\text{mm}$, model 2)



(b) Mesh generation of a single micro hole ($r=0.025\text{mm}$, model 1)



(d) Mesh generation of different dia. holes ($r_1=0.025\text{mm}$, $r_2=0.05\text{mm}$, h_1 =depth of small hole, h_2 =depth of large hole, $r_2/r_1=2$, $h=h_1=h_2$, model 3)

Fig. 2 3D modeling and mesh generation of analysis specimen

Table 1 Dimension, Properties, and Mesh generation

Dimension (mm)	Young's modulus (GPa)	Applied maximum bending stress (MPa)	Poisson's Ratio (ν)
7x7x100	196	196	0.3
Model No.	Node number	Element number	
model 1	1,577	984	
model 2	1,932	1,044	
model 3	1,924	780	

인 형상을 나타내면 Fig. 2(b)~Fig. 2(d)와 같다. Fig. 2(b)는 사각보 중앙에 반지름 $r=0.025\text{mm}$ 인 미소 원공이 1개가 있는 경우로 모델 (1), Fig. 2(c)는 사각보 중앙에 반지름 $r=0.025\text{mm}$ 인 동일 크기의 미소 원공이 2개가 있는 경우로 모델 (2), 그리고 Fig. 2(d)는 직경의 비가 1:2(작은 원의 반지름 $r_1=0.025\text{mm}$, 큰원의 반지름 $r_2=0.05\text{mm}$)이고 깊이가 같은 ($h=h_1=h_2$) 원공이 2개가 있는 경우로 모델 (3)으로 하였다. 각 모델 모두 깊이를 변화시켰으며 모델 (2), (3)의 경우에는 원공사이의 간격(S)를 변화시키면서 해석하였다. 요소 분할시 사각보의 중앙에 미소 원공이 있는 경우에 미소 원공을 중심으로 보가 대칭이 됨으로 보를 2등분하여 해석하였다. 그리고 보를 22block으로 나누었고 원공 주위 block에서는 해의 오차를 줄이기 위하여 원공을 기점으로 block 끝단까지 1:10 간격으로 요소를 분할하여 원공 주위의 요소를 가능한 미세하게 하였고 3-D solid 요소를 사용하였으며 해석에 사용된 program은 상용화된 구조해석 program이다. 그 밖에 해석에 이용된 물리적 특성값과 요소 분할에 대해서는 Table 1에 나타냈다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 미소 원공 주위의 응력 분포

원공이 있는 무한 평판에 원공에서 무한한 y 축 상에서 일정한 인장력이 가해질 경우 이 평판에는 일정 응력 σ 가 가해지게 된다. 이때 원공 주위의 x 축과 y 축 방향으로 분포되는 응력은 Airy의 응력 함수를 이용하여 해를 구할 수 있다. 원공 중심을 원점으로 하는 x, y 축 상에서 균열 진행 방향으로

예상되는 x 축 상의 응력은 식(1)과 같다⁽¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma/2(1 - (r/\ell)^2) 3(r/\ell)^2 \\ \sigma_y &= \sigma/2(2 + (r/\ell)^2 + 3(r/\ell)^4) \\ \tau_{xy} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, r : 원공 반경

ℓ : 원공 중심으로부터 x 축상의 임의의 거리

일반적으로 원공 주위의 응력 및 파괴 문제를 해석할 경우에는 식(1)과 같은 2차원(2D) 해를 이용하고 있으나 실제 문제에서는 서론에서 언급한 바

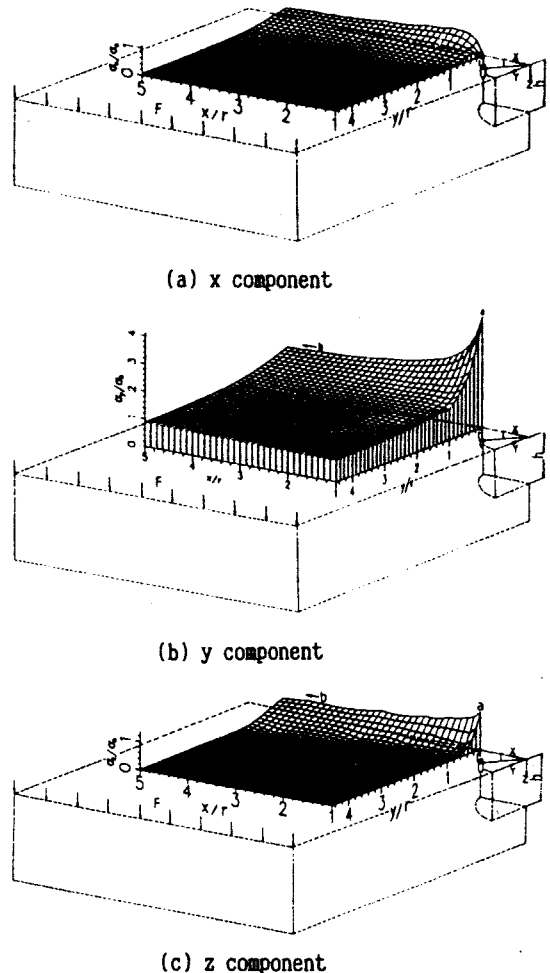


Fig. 3 Stress distribution around a micro hole on the upper surface ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Stress at the arbitrary point x, y , and $x=0, \sigma_0$: nominal stress, $h/r=2$)

와 같이 3차원 문제이기 때문에 식(1)의 적용에는 다소간의 문제점이 있을 것으로 예상된다.

따라서 실제 문제에 대한 해석의 신뢰도 향상을 위하여 모델 1에 대해 구한 본 연구결과와 식(1)을 이용하여 구한 2차원 문제에 대한 결과를 상호 비교하였다.

Fig. 3은 모델 1에서 깊이 대 반지름의 비(h/r)가 2인 경우 원공 상부 표면에서 원공 선단을 기점으로 한 r, y, z 응력 성분 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4 (a), (b)는 모델 1에 대한 해석 결과로 보의 상부 표면에서 $\theta=0$ 일때 원공 선단으로부터 x 축상의 x, y 응력 성분에 대한 응력 분포를 공칭응력(σ_0)로 나누어 나타낸 것이다. 각 경우 공히 원공 직경이 일정하고 깊이가 변할 경우의 응력 분포이고 2D는 식(1)에 의해 구한 2차원인 경우의 응력 분포이다. l/r 이 2.5일 때까지 2D의 σ_x/σ_0 는 3차원 해석 결과의 $h/r=1$ 인 경우와 거의 같고, l/r 이 1.8일 때까지 2D의 σ_x/σ_0 는 3차원 해석 결과의 $h/r=2$ 인 경우와 거의 같은 경향을 나타낸다. 아울러 Fig. 3(b)에서 보면 동일 직경의 원공에서 원공의 깊이가 깊어질수록 응력 크기가 증가하고 응력 집중 정도는 원공 깊이가 얇을수록 극부적이다.

Fig. 5는 원공 경계의 원환 응력(hoop stress)를 구한 결과이다. Fig. 5에서 미소원공 주위의 상부 표면에서 최대 원환 응력($\sigma_{\theta max}/\sigma_0$)는 x 축 상에서 발생하며 그 값은 h/r 이 증감함에 따라 -0.9 에서 -1.25 까지 변한다. 이들 결과에서 σ_{θ}/σ_0 변화는 깊이 변화에 따른 최대 응력의 차이에 비해 최소 응력의 차이는 작게됨을 알 수 있다. 아울러 θ 가 증가함에 따라 σ_{θ}/σ_0 는 인장 상태에서 압축 상태로 변하고 이와같이 응력 상태가 변하는 점($\sigma_{\theta}/\sigma_0=0$)은 3차원 표면 원공의 경우 원공 상부 표면에서 원공의 깊이가 작을수록 그 각도는 작아지며 범위는 $50 < \theta < 60^\circ$ 이며 2차원 관통 원공의 경우에는 $\theta=60^\circ$ ⁽¹⁶⁾이다. Fig. 5에서 파선은 齊藤憲司⁽¹⁷⁾가 반구 pit가 있는 무한체에 1축 인장력이 가해질 경우 반구 pit 주위의 σ_{θ}/σ_0 를 구한 결과로 $\theta=55.7^\circ$ 일때 $\sigma_{\theta}/\sigma_0=0$ 이 되고 최소 σ_{θ}/σ_0 는 -0.65 가 되어 $h/r=1$ 인 경우와 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 아울러 3차원 표면 원공의 경우 $\theta=63^\circ$ 부근에서 깊이에 관계없이 원환 응력이 같게 된다.

이상의 결과에서 3차원 표면 원공에서 $h/r=1 \sim 2$ 인 경우의 응력 크기 및 분포는 2D의 경우와

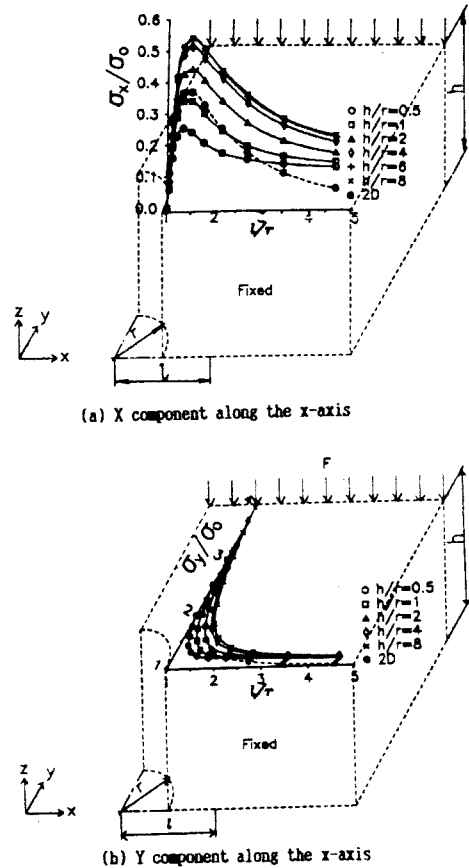


Fig. 4 Stress distribution along the x-axis(model 1)

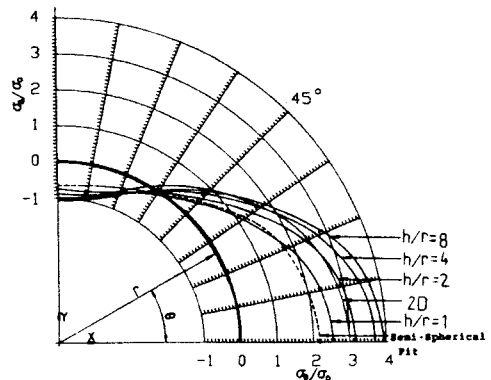


Fig. 5 Hoop stress distribution about the boundary of the hole(Model 1)

거의 같고 깊이가 이보다 얇을 경우에는 2D의 경우보다 응력이 작고 깊을 경우에는 2D의 경우보다 응력이 큼을 알 수 있다.

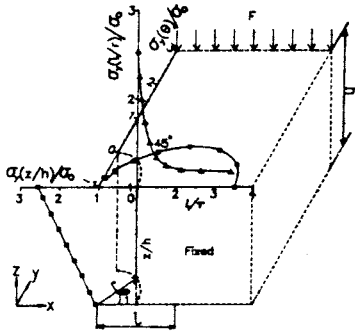


Fig. 6 Stress distribution about the boundary and around the hole(Model 1)

Fig. 6은 $h/r=1$ 인 경우에 원공경계(θ 방향), 깊이(z 축) 및 균열 진행방향(x 축)에서의 응력중 y 성분에 대한 응력 분포를 나타낸 결과로써 원공 경계는 $\theta-\sigma_y(\theta)/\sigma_0$, 깊이 방향으로는 $z/h-\sigma_y(z/h)/\sigma_0$, 균열 진행 방향에서는 $l/r-\sigma_y(l/r)/\sigma_0$ 의 관계를 나타낸 것이다.

3.2 상대 응력 분포

노치나 결함 등 응력 집중원에서 응력장의 강도를 최대 응력과 반경을 이용하여 규정하는 것은, 균열 문제에서 응력장의 강도를 응력 확대 계수로 규정하는 것에 상당한다⁽¹⁸⁾. 따라서 노치나 결함 등 응력집중원에서의 응력장에 대한 상기 고찰 방법은 각종 하중 조건하에서 파괴에 관련한 제 현상에 대해 중요한 의미를 갖고 있다. 이와 같은 관점에서 본 절에서는 표면 미소 원공의 깊이 변화에 따른 응력분포의 해석결과에 대해 고찰하였다.

응력 분포의 물리적 의미를 비교하기 위하여 응력 방향과 수직이 되는 미소 원공 원주 상에 걸리는 최대 응력을 1로 하였을 때의 응력 분포(이하 상대 응력 분포라고 함)를 구하였다.

Fig. 7은 모델 1의 경우에 대한 상대 응력 분포를 해석한 결과이다. 여기서 상대응력 $\sigma(l/r)$ 은 원공으로부터 발생한 균열 길이에 상당하는 부분의 응력을 원주상의 최대 응력을 1로 하였을 때 나타낸 값이다. 이때 상대 응력은 원공에서부터 균열이 발생하였을 때 원공을 균열의 일부로 취급하지 않은 균열에 대한 무차원 응력 확대 계수 $F' (=K_I / (1.1215 K_I \sigma(\pi c)^{1/2}))$ 와 거의 같아 균열이 없을 때의 응력 분포로 응력 확대 계수를 구할 수 있음으로⁽¹⁹⁾ 상대 응력 분포로 미소 원공에서 발생한 균

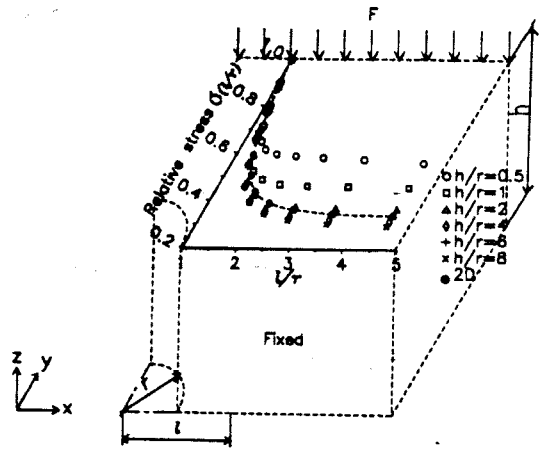


Fig. 7 Relative stress distribution of a micro hole(Model 1)

열에 대한 파괴 역학적 해석이 가능하다.

Fig. 7에서 반경 r 이 일정하고 깊이가 변하여도 원공으로 부터 동일 길이 c 의 균열이 있을 때 원공선단의 최대 응력이 동일하다면 r 에 비해 균열이 작은범위($l/r \leq 1.05$, $l=r+c$)에서의 상대 응력 분포가 같아 응력 확대 계수가 같음을 알 수 있다. 아울러 $h/r \geq 3$ 인 경우는 동일 균열 길이에서 응력 확대 계수가 2차원 평판 원공에 대한 식(1)의 σ_y 를 이용하여 구한 결과와 거의 같게 되어 Chijwa나 염⁽²⁰⁾ 등이 회전 굽힘을 받는 피로 시험편에서 원공의 깊이(h)가 원공의 반지름(r)과 비교하여 $h/r \geq 3$ 인 경우에는 관통한 시험편의 피로 강도와 같다는 결과와도 잘 일치하여 상대 응력 분포를 구함으로써 미소 원공 등의 결함이나 응력 집중원에서 발생한 균열에 대한 파괴 역학적 해석이 가능하다.

3.3 유효 균열 길이

균열이 결함길이에 비교하여 어느 정도의 길이가 되면 결함은 균열의 일부로서 취급할 수 있다. 특히 미소 원공의 반지름 r 과 미소 원공 선단에서의 균열 길이 c 를 합한 $l(=r+c)$ 를 균열 길이로 하고 σ 를 외부 작용 응력으로 할 경우 $K_I = \sigma(\pi(r+c))^{1/2} F_I$ 에 의해 응력 확대 계수 K_I 을 평가할 수 있다⁽²¹⁾. 여기서 F_I 은 미소 원공을 균열의 일부로 취급하였을 때의 무차원 응력 확대 계수이다. 본 절에서는 원공에서 발생한 균열의 원공 깊이에 따른 거동을 파괴 매개 변수인 F_I 을 이용하여 고찰

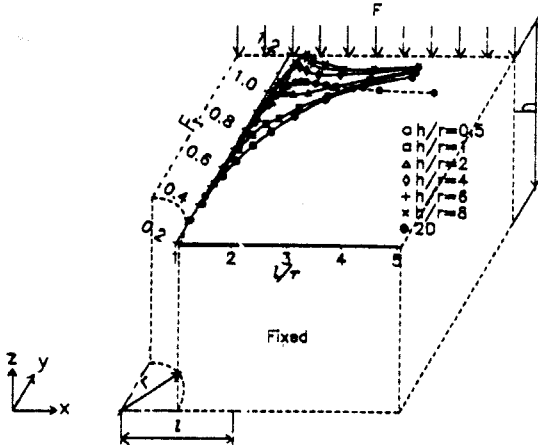


Fig. 8 Nondimensional stress intensity factor of a crack from a micro hole

하였다.

Fig. 8은 모델 1에 대한 F_1 을 해석한 결과이다. 여기서 파선은 Bowie⁽²²⁾ 등이 해석한 2차원 원공에 대한 값이다. F_1 값은 동일 균열 길이일 경우 원공 깊이가 깊어질수록 증가하고 $h/r \leq 2$ 인 경우에는 3차원으로 해석한 결과 보다 $l/r \leq 2$ 에서 2차원 원공에 대한 값이 크고 $l/r > 2$ 에서는 2차원 원공에 대한 값이 작게 된다. Fig. 8에서 $F_1 \geq 1$ 인 경우는 응력 확대 계수를 유효 균열 길이로 계산할 수 있는 범위를 의미한다⁽¹⁹⁾. h/r 이 큰 순서에 따라 $F_1=1$ 이 되는 값은 $h/r \geq 4$ 인 경우 $l/r=1.1$, $h/r=2$ 인 경우 $l/r=1.75$, $h/r \leq 1$ 인 경우는 원공에 비해 균열이 어느정도 큰 경우($l/r \geq 2, 3$)에 유효 균열 길이로 간주할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 미소 원공 사이의 간섭

(1) 원공 사이의 응력 분포

Fig. 9는 모델 2에서 $h/r=4$ 인 균열 진행방향을로서의 응력중 y 성분에 대한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 9에서 우측에 있는 결과는 원공 사이의 응력 분포로 두 원공 사이의 중앙부까지의 값이고 좌측에 있는 결과는 원공 외측의 응력 분포다. 원공 사이의 응력 분포는 원공간 간격에 따라 원공간 응력 간섭에 의해 응력이 변하고 원공 외측은 원공간 간격이 변하여도 응력의 변화가 거의 없어 응력 간섭 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 원공간 응력 간섭 영향을 고찰하기 위하여 원공 사이의 응력 분포에 대해서만 검토하였

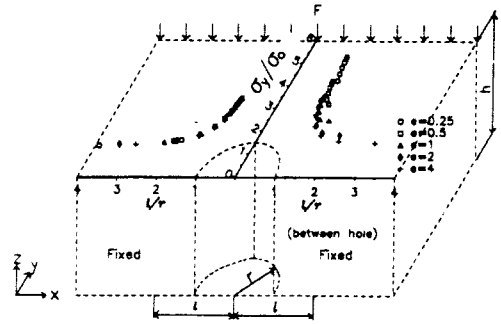


Fig. 9 Stress distribution of twin hole($h/r=4$, y component)

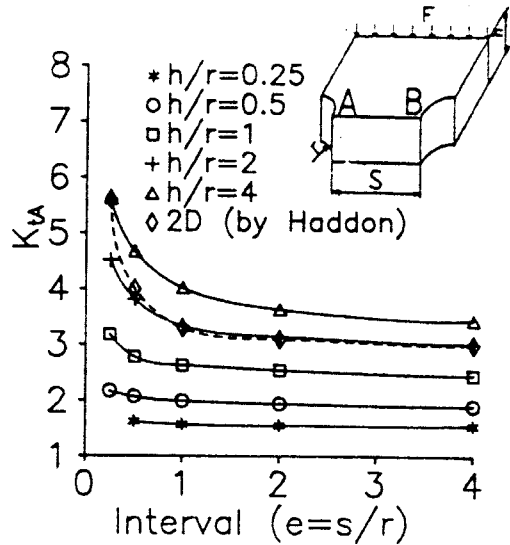


Fig. 10 K_{tA} of twin hole at hole edge($e=s/r$)

다.

Fig. 10, Fig. 11은 모델 2와 모델 3에 대한 최대 응력 점인 A,B의 응력집중계수(K_{tA})를 원공간 간격이 변할 경우에 대해 나타낸 것이다. 최대 응력점은 모델 2의 경우는 각원공의 직경이 같음으로 A,B점이고 모델 3의 경우는 직경이 작은 원공의 A점이다. 이들 결과를 Haddon⁽²³⁾이 2차원 평판의 판통 원공에서 원공사이의 간격이 변하는 경우에 대해 이론적으로 해석한 결과와 비교하면, 모델 2의 경우에는 $h/r=2$ 일 때, 모델 3의 경우에는 $h/r=3$ 일 때의 결과와 일치함을 알 수 있다.

이들 원공에 대한 상호 응력 간섭 범위를 응력 간섭 영향계수 γ 을 이용하여 정리하였다. 여기서

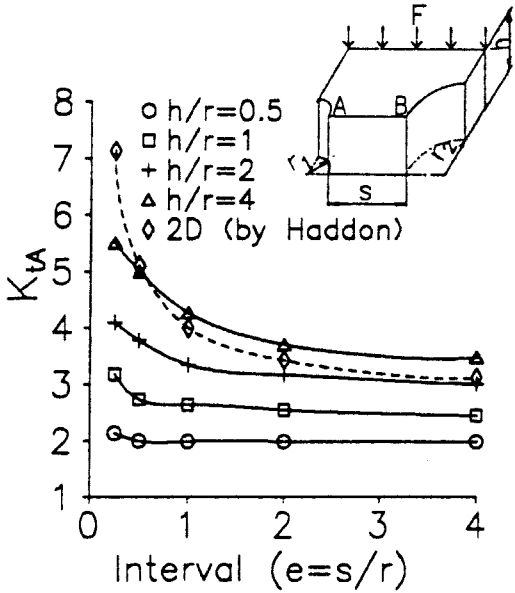


Fig. 11 K_{tA} of different dia. hole at hole edge($e=s/r$)

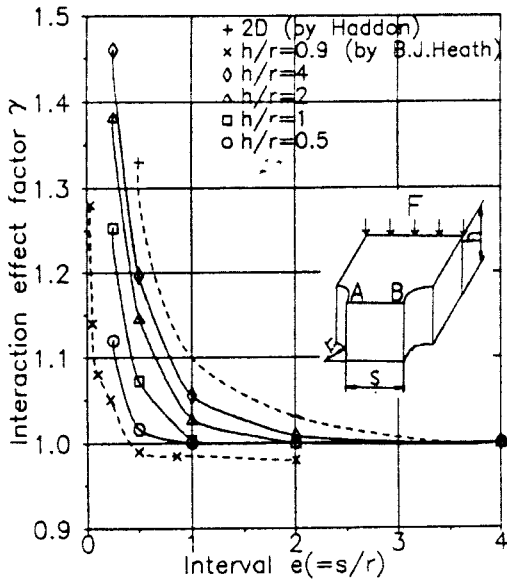


Fig. 12 Comparison of effect of micro hole spacing e on stress concentration factor for twin micro hole configuration

γ 는 모델 1의 최대 응력과 모델 2.3의 최대 응력 점인 A의 응력비를 나타낸 것이다. Fig. 12와 Fig. 13에서 원공 깊이가 깊어질수록 원공사이의 상호응력 간섭영향이 있는 원공간 간격은 점차로 증가하

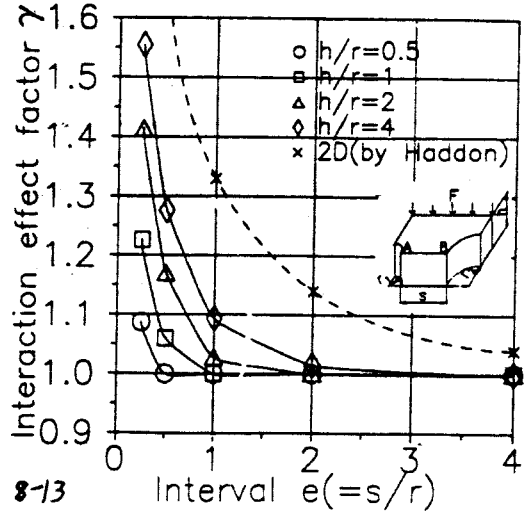


Fig. 13 Comparison of effect of micro hole spacing e on stress concentration factor for different micro hole configuration($r_2/r_1=2, h_1=h_2$)

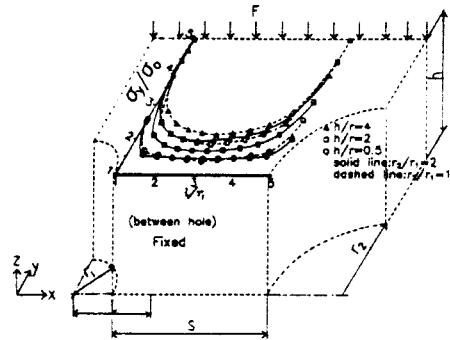


Fig. 14 Stress distribution between micro holes($e=1.0$, Dashed: $r_2/r_1=1$, Solid: $r_2/r_1=2$)

여 모델 2에서는, $h/r=0.5$ 인 경우 $e=1, h/r=1$ 인 경우 $1 < e < 2, h/r=2$ 인 경우 $e=2, h/r=4$ 인 경우 $2 < e < 4$ 이고 모델 3에서는, $h/r=0.5$ 인 경우 $e=0.5, h/r=1$ 인 경우 $0.5 < e < 1, h/r=2$ 인 경우 $1 < e < 2, h/r=4$ 인 경우 $2 < e < 4$ 이고 2차원 관통 원공에서는 그 이상으로, 깊이가 깊을수록 응력 간섭을 일으키는 범위는 증가하고 2차원 관통 원공의 경우보다는 작음을 알 수 있다.

이와 같은 원공깊이 변화에 따라 응력간섭을 일으키는 원공간 간격이 변화하는 이유는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 원공깊이가 얇을수록 응력 크기가 감소하고 응력 분포가 국부적인데 기인한다.

(2) 유효 균열 길이

Fig. 15는 모델 2와 3에서 $h/r=4$ 인 경우(모델 3의 경우는 $h_1/r_1=4$) 균열 길이에 해당하는 부분의 무차원 응력 확대 계수를 나타낸 것이다.

이들 결과에서 원공간격이 멀어질수록 유효 균열 개시 길이는 모델 2의 경우, $e=0.25$ 일 때 $l/r=1.04$ 에서 $e=4$ 일 때 $l/r=1.25$ 로 증가하고, 모델 3의 경우 $e=0.25$ 일 때 $l/r=1.04$ 에서 $e=4$ 일 때 $l/r=1.22$ 로 증가한다. 그리고 이 두 결과를 비교하면 $e=0.25$ 인 경우는 유효 균열 개시 길이는 두 결과가 거의 같고, $e>0.25$ 인 경우는 모델 3의 경우가 모델 2의 경우보다 약간 길다. 따라서 동일 깊이의 원공에서 동일 직경의 원공이 있는 경우보다 한편의 원공 직경이 큰 원공이 있는 경우의 균열 전파 속도가 작은 것을 예상할 수 있다. 이는

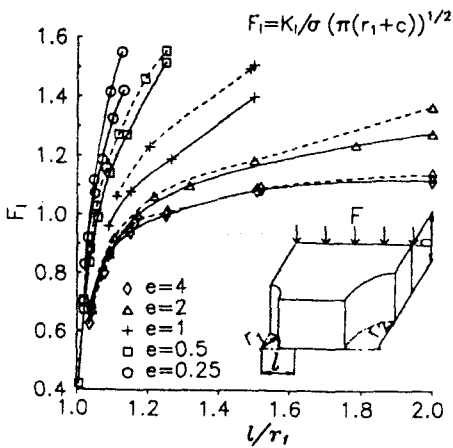


Fig. 15 Nondimensional stress intensity factor of a crack from a micro hole($h/r=h_1/r_1=4$, dashed: $r_2/r_1=1$, solid $r_2/r_1=2$)

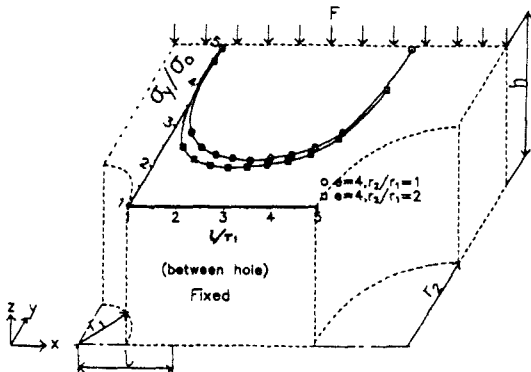


Fig. 16 Stress distribution between holes($h/r=4$)

Fig. 16에서와 같이 균열 길이에 해당하는 부분의 응력 분포에서 응력의 크기가 모델 3의 경우가 모델 2의 경우보다 작기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 미소 표면 결함으로 간주한 미소 표면 원공 주위에서 발생 전파하는 표면 균열 거동에 미치는 결함의 크기와 간섭 영향을 고찰하기 위하여 3차원 유한 요소모델을 이용하여 미소 표면 원공 주위의 응력 분포를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소 표면 원공의 직경이 일정하고 깊이가 깊어질수록 원공 주위의 응력크기는 증가하고 응력 집중 정도는 원공 깊이가 얇을수록 극부적이며, $h/r \geq 2$ 인 경우는 원공 선단으로부터 균열 진행 방향으로의 응력 크기는 2차원 무한 평판에 원공이 있는 경우보다 크지만 전체적인 응력 분포는 거의 같다.

(2) 원공 경계에서 원환 응력이 인장에서 압축으로 변하는 점($\sigma_\theta=0$)은 하중 방향에 수직되는 축을 기점으로 2차원 원공의 경우는 $\theta=60^\circ$ 이지만 3차원 표면 원공인 경우는 h/r 에 따라 차이가 있고 그 범위는 $50^\circ < \theta < 60^\circ$ 이다.

(3) 상대 응력 분포를 구함으로써 미소 원공 등의 결함이나 응력 집중원에서 발생한 균열에 대한 파괴 역학적 해석이 가능하다.

(4) 원공 깊이가 깊어질수록 원공 사이의 상호 응력 간섭 영향이 있는 범위는 점차로 증가하고 $h/r=0.5$ 에서 $h/r=4$ 까지 변할 때 이 범위는 모델 2의 경우 $e=1$ 에서 $2 < e < 4$ 까지 변화하며 모델 3의 경우 $e=0.5$ 에서 $2 < e < 4$ 까지 변하고, 3차원 표면 원공보다 2차원 원공의 경우가 크다. 이는 원공의 깊이가 얇을수록 응력 크기가 작아지고 응력 분포가 극부적이 되기 때문이다.

(5) 응력 분포의 영향에 의한 응력 확대 계수를 비교한 결과, 동일 깊이의 원공에서 동일 직경의 원공이 있는 경우보다 한편의 원공 직경이 큰 원공이 있는 경우의 균열 전파 속도가 작은 것을 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

(1) 宋森弘, 國尾, 1974, "高硬度鋼のマイクロ領域におけ

- る疲労き製生過程,” 日本機械學會論文集 Vol.40, No.334, pp.1503~1510.
- (2) 송삼홍, 1975, “열 처리 강재의 피로 거동에 관한 연구”, 대한 기계 학회지, 제15권, 제3호, pp.275~283.
- (3) Song, S.H. and Kunio, T., 1972, “Fatigue Crack Formation at High Hardness Steels,” Proc. Ist. Int. Conf. Mech. behavior of Materials,” Kyoto, Vol. II, pp.143~152.
- (4) 國尾武, 宋森弘, 1973, “低炭素マルテソサイト組織の疲労挙動におよぼすオスナイト結晶粒度,” 日本機械學會論文集, 第39巻, 第124號, pp.2291~2298.
- (5) 平修二, 外 2人, 1972, “焼入焼もどし炭素鋼の疲れ破壊に関する研究,” 日本機械學會論文集, 第38巻, 第312號, pp.3509~3066.
- (6) 송삼홍, 오환섭, 1985, “표면 결함에서 발생하는 피로 크랙 거동”, 대한 기계 학회 논문집, 제9권, 제2호, pp.150~157.
- (7) 송삼홍, 오환섭, 1985, “미소 원공 주위의 피로 크랙 발생 전과 거동에 관한 연구”, 한국 해양 공학회지, 제1권, 제2호, pp.250~258.
- (8) 송삼홍, 윤명진, 1986, “미소 원공 및 미소 슬릿재의 피로 크랙 전과 거동”, 대한 기계 학회 논문집, 제10권, 제1호, pp.78~85.
- (9) 송삼홍, 윤명진, 1988, “프리 크랙과 미소 원공재의 크랙 성장 하한계 조건에 관한 연구”, 대한 기계 학회 논문집, 제12권, 제2호, pp.278~295.
- (10) 村上敬宜 外2人, 1987, “マルエジング鋼の疲労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巻, 第492號, pp.1482~1492.
- (11) 송삼홍, 오환섭, 1987, “미소 원공 주위의 피로 크랙 발생 전과 거동에 관한 연구,” 제1회 재료 강도 Symposium, pp.251~258.
- (12) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., 1982, “Interacting Dissimilar Semi-Elliptic Surface Flaws under Tension and Bending,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.16, No.3, pp.373~386.
- (13) Heath, B.J. and Grandt, Jr., A.F. 1984, “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.
- (14) 新井淳一, 外2人, 1983, “隣接表面き裂の相互間渉効果,” 日本機械學會論文集(A), 第71巻, 第589號, pp.20~35.
- (15) 西谷弘新, 1968, “切欠き干涉効果の近似計算法とその應用,” 日本機械學會志, 第71巻, 第589號, pp.209~221.
- (16) James, W. Dally and William F. Riley, 1974, “Experimental Stress Analysis,” McGraw-Hill Kagakusha Ltd, pp.76~81.
- (17) 齋藤憲司, 中原一郎, 1967, “半球ピットを有する件無限體の1軸引張り,” 日本機械學會論文集, 第33巻, 第247號, pp.343~350.
- (18) 西谷弘新, 1983, “き裂における應力擴大係數に相當する, 切欠きにおける應力場の尺度,” 日本機械學會論文集(A), 第48巻, 第447號, pp.1353~1359.
- (19) 西谷弘新, 石田城, 1973, “主軸端にき裂をもつた圓孔の引場りにおける應力擴大係數,” 日本機械學會論文集(A), 第39巻, 第317號, pp.7~14.
- (20) 葉英하, 1974, “회전 굽힘을 받는 스프링 강재의 피로 강도와 크랙 전과에 관한 연구 (1)”, 대한 기계 학회 논문집, 제14권, 제2호, pp.149~161.
- (21) Rooke, D.P., Baratra, F.I. and Cartwright, D.J., 1981, “Simple Methods of Determining Stress Intensity Factors,” Engineering Fracture Mechanics, Vol.14, pp.397~426.
- (22) Bowie, O.L., 1956, “Analysis of An Infinite Plate Containing Radial Cracks Originating at the Boundary of an Internal Circular Hole,” J. Math. Phys., Vol.35, pp.60~71.
- (23) Haddon, R.A.W., 1967, “Stress in An Infinite Plate with Two Unequal Circular Holes,” Q.J. Mech.Math., Vol.20, pp.277~291.