

응력 집중원에서 발생하는 초기 균열의 거동에 미치는 응력장의 영향

송삼홍*, 김진봉**

Stress Effects on Activity of Primary Cracks Initiating at Stress Concentrator

Sam Hong Song*, Jin Bong Kim**

ABSTRACT

This study has been performed to investigate the stress distribution around defects that behave as stress concentrators and fracture mechanical analysis for cracks initiating at stress concentrators. The stress distribution was analyzed using Finite Element Method and non dimensional stress intensity factor was determined by the mean stress method. In addition, stress interaction effects around defects and cracks were compared.

Key Words : Finite Element Analysis (유한요소해석), Stress Interaction (응력간섭), Mean Stress (평균응력), Defect (결함), Non Dimensional Stress Intensity Factor (무차원 응력확대계수)

기호설명

s = 결함 선단간 거리
 r = 결함 반지름
 $e = s/r$
 h = 결함 깊이
 c = 원공, notch 또는 균열 선단으로 부터의 거리
 K = 응력 확대 계수
 $B(x/r)$ = 판 두께를 관통하는 관통 균열에 대한 Bowie 수정 계수
 ϕ = 제 2종 완전 타원 적분
 M_1 = 균열 전방 자유 표면 수정 계수
 F = 무차원 응력확대 계수

1. 서론

각종 구조재로 사용되는 금속 재료에는 미소 공공(空孔)이나 비금속 개재물 등 각종 크기의 자연 결함이나 인공 결함들이 내재되어 있다.

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

한편 이들 결함들이 재료 내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고, 아울러 분포되어 있는

* 고려대학교 기계공학과
 ** 한서대학교 항공기계학과

상태도 인접하거나 원접하는 등 다양하다^(5,6).

이와 같이 다양하게 분포된 결함이나 이들 결함에서 발생한 균열들이 인접하여 있을 경우에는 상호 간섭으로 인하여 이들이 단독으로 존재할 경우와는 다르게 응력이 분포되고, 균열전파 거동도 다르게 된다. 즉 결함들이 인접하여 있을 경우에는 각 결함들에 의해 분포하는 응력장의 중첩 효과가 나타나며^(7,8), 인접한 균열 사이에서도 간섭 영향이 나타나게 되는데, 이 경우에는 응력 확대 계수에 의해 간섭 영향을 평가하게 된다^(9,10). 이와 같이 재료 내에 내재하여 있는 결함이 응력 집중원으로 거동을 하고 이들 결함에서 균열이 발생되어 전파될 경우에는 이들 사이 응력장의 간섭에 의한 중첩 효과 때문에 특이 응력장이 형성되어 응력 확대 계수가 급격하게 증가됨으로서 균열들은 서로 빠른 속도로 합체된다. 따라서 응력 집중원인 결함으로부터 발생되어 전파되는 균열들이 서로 간섭하여 상승 효과를 나타내는 간섭 영향을 평가하기 위해서는 이들의 영향까지를 고려한 응력 확대 계수를 산정하는 것이 실용상 중요한 의미를 갖게 될 것으로 본다.

한편 응력 집중원으로부터 발생되어 전파되는 균열에 대한 응력 확대 계수에 관련된 연구는 2차원 형상⁽¹¹⁾이나 3차원 형상에 관한 것으로 구분할 수 있다. 이 중 실제 문제에서 접하게 되는 3차원 형상에 관련하여서는 표면 균열⁽¹²⁾이나 구석 균열⁽¹³⁾에 대한 연구 결과들이 있다.

이들 3차원 결함 형상 중 원통형 결함으로부터 균열이 발생하는 초기에는 하중 방향에 수직인 축상의 결함 표면 양끝에서 구석 균열이 발생되어 성장되지만 균열이 점차로 성장되어 균열의 내부 길이가 초기 결함의 깊이를 초과하게 되면 표면 균열로 전파하게 된다⁽¹⁴⁾. 따라서 원통형 결함으로부터 발생하는 균열 전파 초기의 응력 확대 계수는 구석 균열에 대하여 해석을 하고, 그 후에 표면 균열의 형태로 전파될 경우에는 표면 균열에 대한 응력 확대 계수로 균열 거동을 평가하여야 한다. 그러나 현재까지 발표된 대부분의 응력확대 계수는 평판 중의 관통 원공에 대한 해석 결과들로서 구석 균열에 대한 엄밀해가 없기 때문에 반다면 표면 균열에 대한 응력확대 계수를 수정하여 해를 구하고 있어 해의 정밀도가 다소 저하되고 있다.

따라서 본 논문에서는 실제 문제에서 접하게 되

는 3차원 형상의 표면 결함으로부터 발생되어 전파되는 균열의 거동에 미치는 응력장의 영향을 규명하기 위하여 재료 내의 결함으로 가정한 미소 원통형 결함에 대해 유한 요소 법으로 응력 해석을 한 후에, 응력 집중원인 이 결함으로부터 발생되어 전파되는 균열에 대한 응력 확대 계수를 산출하였다. 이들 결과를 이용하여 응력 집중원으로부터 발생되어 전파되는 균열의 초기 거동에 미치는 응력장의 영향을 고찰하였고, 아울러 인접하거나 원접한 결함이나 균열 사이의 간섭 효과에 대해서도 고찰하였다.

2. 해석 모델 및 방법

재료 내에 결함이 존재하는 경우에 이들을 기점으로 성장하여 전파되는 균열 거동을 해석하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 해석 모델을 만들어 응력장을 검토코저 하였다. Fig. 1의 해석 model은 단면이 7(mm) x 7(mm)이고 길이가 100mm인 사각 단면 보의 표면 중앙에 미소 원통형 결함이 있는 형태이다.

미소 결함의 형상을 원통형으로 한 이유는 실제 문제에서 결함 형상이 구(球)형, 반구(半球)형, 반타원형이나 원통형등 다양하나, 결함에 대한 최근의 연구 결과중 미소 drill을 이용하여 인공적으로 결함을 가공하는 연구가 행하여지고 있는 것을 고려하여, drill 형상의 결함중 drill 사심(死心 : dead center)의 각도가 180°인 경우로 가정하여 원통형으로 하였다. 한편 결함의 반지름(r)은 0.025mm로 하였으며, 깊이(h)는 0.0125mm, 0.025mm, 0.05mm, 0.05mm로 하여 반지름과의 비(h/r)가 0.5, 1, 2, 4인 4가지 경우에 대하여 해석하였다. 그리고 결함간 응력의 간섭이나 이 결함으로부터 발생되어 전파되는 균열들이 서로 간섭하여 상승 효과를 나타내는 영향을 평가하기 위하여, 마주하는 초기 결함 선단간 간격을 0.025mm, 0.05mm, 0.1mm가 되도록 배치하여 결함들의 선단간 거리(s) 대 반지름(r)의 비($e=s/r$)가 1, 2, 4인 3가지 경우에 대해 해석하였다. 한편 서로 마주하는 결함의 형태는 동일 크기의 결함이 마주하는 경우와 반지름의 비($r_1:r_2$)가 1:2인 결함이 마주하는 2 가지 경우에 대하여 해석하였다.

보의 지지 형태 및 하중방식은 Fig.1에서

보는 바와 같이 보의 양단이 단순 지지되고, 보의 중앙에 위치한 결함의 반대편에 하중이 가해지는 3점 굽힘 방식으로 하였다.

해석을 위하여 상용화된 구조 해석 program 을 사용하였고, 사용된 요소는 8-node solid이며 절점수 및 해석에 사용된 특성치는 Table 1에서 보는 바와 같다. 한편 보 전체에 비해 결함의 크기가 매우 작기 때문에 이를 확대한 대표적인 형상은 Fig.1에 보인 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 2 등분된 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.

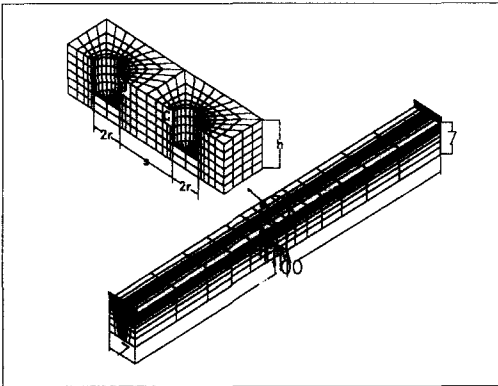


Fig. 1 3D modeling of analysis specimen

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 균열 선단의 평균 응력

응력 집중원에서 발생하는 균열의 거동은 응력 집중원에 의해 형성되는 응력장의 영향을 받게 됨으로, 응력장내에 있는 균열에 대해서는 응력 집중원에 의한 응력 분포 영향을 고려하여 응력확대 계수를 구할수 있다. 이에 관련된 방법으로는 응력 집중법⁽¹⁵⁾과 응력 분포법

Table 1 Characteristics of analysis model

(a) Dimension and properties of analysis model

Dimension (mm)	Young's modulus	Maximum bending stress (MPa)	Poisson's ratio(ν)
7×7×100	196	196	0.3

(b) Number of node and element of analysis

Defect type	Number of node	Number of element
Single hole	1,577	984
Twin holes	1,932	1,044
Different type holes	1,924	780

이 있는데, 응력 분포법은 다시 최대 응력법⁽¹⁶⁾과 평균 응력법⁽¹⁷⁾으로 분류할 수 있다. 이들 방법중 피로 한도는 응력 집중력에 의해 지배되는 것이 아니라 응력 집중부의 특정 범위의 평균 응력에 의해 지배된다는 관점⁽¹⁴⁾을 고려하여, 본 연구에서는 평균 응력법을 이용하여 응력 확대 계수를 구하였다.

여기서 평균 응력법은 식 (1)과 같이 응력 집중원인 원공이나 notch 선단으로부터 발생된 균열의 전과 방향으로의 임의 구간 내에서 평균 응력을 구하는 것이다.

$$\sigma_{y,mean} = 1/c \int_0^c \sigma_y(x)dx \quad (1)$$

c:원공, notch 또는 균열 선단으로부터의 거리

한편 이상의 평균 응력법으로 산출한 초기 결함과 이 결함에서 발생된 균열 선단의 평균 응력 분포의 특성은 다음과 같다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 Fig. 2와 같이 초기 응력 분포를 구한 뒤 결함이나 균열 선단으로부터의 평균 응력을 구하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 Fig. 2와 같이 h/r=2이고 결함간 간격 e가 4인 동일 크기의 결함들이 마주하고 있는 상태에서 각 결함선단으로부터 동일 길이의 구석균열이 성장되었을 경우에 이들 균열 사이의 σ_y/σ_0 분포를 나타낸 것이다.

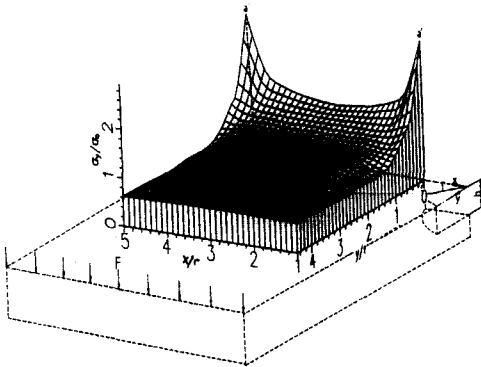


Fig. 2 Distribution of stress on the upper surface between twin micro holes ($h/r=2, e=s/r=4$)

Fig. 3은 각 경우의 초기 응력분포를 나타낸 것으로 ■는 균열이 발생되지 않았을 때 결합 사이의 초기 응력분포이고, ○, □, △는 균열이 $c = 0.4r, 0.8r, 1.2r$ 만큼 전파되었을 때의 응력분포를 나타낸 것으로 각 경우의 균열선단 위치는 1, 2, 3으로 표시하였다. 여기서 결합으로부터 발생된 균열선단의 σ_y 는 동일 위치에서의 균열 발생 전 초기 σ_y 에 비해 30-40% 정도의 차이가 발생된 것을 알 수 있다.

Fig.4는 Fig.3의 초기 응력 σ_y 에 대한 평균 응력을 구한 결과이다. 여기서 균열이 없을 때의 평균 응력과 균열이 1, 2, 3 위치만큼 전파되었을 때의 평균 응력의 차이는 5% 이내가 되었다.

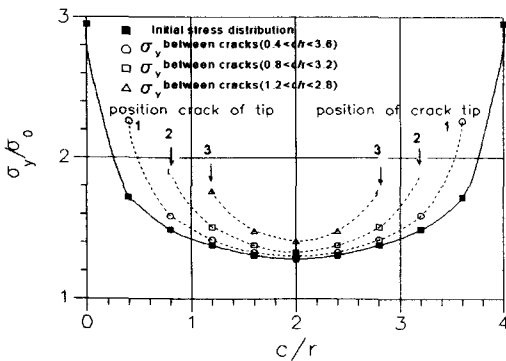


Fig. 3 Initial stress distribution between holes or corner cracks emanating from holes($h/r=2, e=s/r=4$)

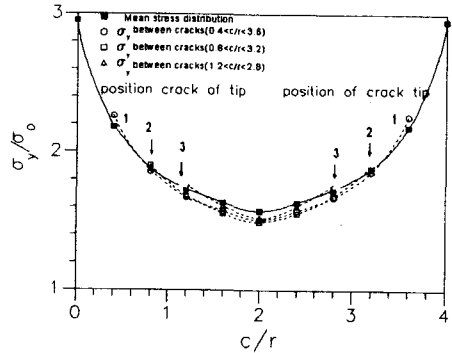


Fig. 4 Mean stress distribution between holes or cracks emanating from holes($h/r=2, e=4$)

이상에서 응력 집중원으로부터 균열이 발생되어 전파되었을 때 균열 선단 주위의 응력 분포는 응력 집중원에 의한 초기 응력분포와 차이가 있게 되나, 각 경우의 초기 응력에 대한 평균 응력분포는 거의 동일하게 된 것을 알 수 있다. 따라서 초기 결합에 의해 분포되는 응력장 범위 내에서 발생되어 전파되는 균열 선단의 평균 응력은 이 결합에 의한 평균 응력분포에 의해 지배된다는 것을 알 수 있다.

3.2 응력분포 보정에 의한 응력확대 계수 산출

표면 결합에서 균열이 발생되면 균열의 전파형태는 Photo 1에서 보는 바와 같이 균열의 발생초기에는 구석 균열 형태로 전파되다 깊이 방향으로의 균열이 결합의 초기 깊이보다 커지면 표면 균열로서 전파하게 된다. 따라서 표면 결합에서 발생된 균열전파 초기의 거동을 해석하기 위해서는 구석 균열에 대한 응력확대 계수의 산출이 요구된다.

그러나 이와 같은 형태의 표면 구석 균열의 응력 확대계수에 대한 엄밀해가 없기 때문에 본 연구에서는 Rudd 등⁽¹⁸⁾이 제안한 바와 같이 관통 원공에서 발생하는 1/4 타원형 구석균열에 대한 식 (2)를 수정하여 응력확대계수의 근사해를 구하였다. 원통형 표면 결합에서 발생된 구석 균열의 형태는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 원공 내면의 길이가 a , 상부표면에서의 길

이가 c 인 1/4 타원형으로 하였다. 여기서 a, c 는 결함 선단인 B점을 기점으로 하여 결함 내면과 표면에서 동일한 응력이 되는 지점까지의 길이를 나타낸 것으로 a/c 는 타원 균열의 형상비가 된다.



Photo 1 Feature of corner and surface crack propagation

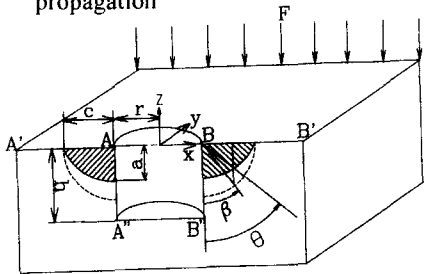


Fig. 5 Configuration of quarter-elliptical cracks emanating from the corner of a hole

$$K = \sigma_0 (\pi a)^{\frac{1}{2}} B\left(\frac{x}{r}\right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{a}{c}, \beta\right), \quad a/c \leq 1 \quad (2)$$

$$K = \sigma_0 (\pi a)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}} B\left(\frac{x}{r}\right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{c}{a}, \beta\right), \quad a/c > 1$$

여기서,

$B(x/r)$: 판 두께를 관통하는 관통 균열에 대한 Bowie 수정계수⁽¹¹⁾

Φ : 제 2종 완전 타원 적분

M_1 : $M \times M_1$

M : $\left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \sin^2 \beta + \cos^2 \beta\right]^{1/4}, \quad a/c \leq 1$

$\left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \beta + \sin^2 \beta\right]^{1/4}, \quad a/c > 1$

M_1 : 균열 전방 자유 표면 수정 계수

$B(x/r)$ 는 2차원 관통 원공으로부터 발생되어 전파되는 균열에 대한 응력분포 형태에 따른 수정계수이다. 본 연구에서는 $B(x/r)$ 대신에 표면결함에 대한 평균 응력분포 수정계수 $M_k(c/r)$ 로 대체하여 식 (2)를 식 (3)과 같이 수정하였다.

$$K = \sigma_0 (\pi a)^{\frac{1}{2}} M_k\left(\frac{c}{r}\right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{a}{c}, \beta\right), \quad a/c \leq 1 \quad (3)$$

$$K = \sigma_0 (\pi a)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}} M_k\left(\frac{c}{r}\right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{c}{a}, \beta\right), \quad a/c > 1$$

여기서 $\frac{M_1}{\Phi}$ 는 Fig.6에서 보는 바와 같다.

Fig. 6에서 (a)는 균열의 형상비 a/c 가 1보다 작은 경우에 대한 $\frac{M_1}{\Phi}$ 이고 (b)는 균열의 형

상비 a/c 가 1보다 큰 경우에 대한 $\frac{M_1}{\Phi}$ 이다.

이들 결과를 이용하여 본 연구에서는 $\beta=90^\circ$ 인 표면 방향 (B-B', A-A')으로 전파되는 균열에 대한 응력확대계수를 구하였다. $\beta=90^\circ$ 일 때 Fig.

6에서 $\frac{M_1}{\Phi}$ 의 값은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{M_1}{\Phi} = & 0.107 + 2.9367 \left(\frac{a}{c}\right) - 6.3575 \left(\frac{a}{c}\right)^2 + 4.538 \\ & \left(\frac{a}{c}\right)^3 + 11.09 \left(\frac{a}{c}\right)^4 - 28.181 \left(\frac{a}{c}\right)^5 + 23.9 \\ & \left(\frac{a}{c}\right)^6 - 7.189 \left(\frac{a}{c}\right)^7 \quad a/c \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_1}{\Phi} = & 1 - 0.044 \left(\frac{a}{c}\right) + 0.6627 \left(\frac{a}{c}\right)^2 - 7.306 \\ & \left(\frac{a}{c}\right)^3 + 22.094 \left(\frac{a}{c}\right)^4 - 33 \left(\frac{a}{c}\right)^5 + 24.626 \\ & \left(\frac{a}{c}\right)^6 - 7.278 \left(\frac{a}{c}\right)^7 \quad a/c > 1 \end{aligned}$$

한편 식 (3)의 응력확대 계수는 균열의 각종 경계 조건에 대한 수정 계수인 무차원 응력 확대 계수 F 를 도입하여 식 (5)와 같이 정의 할 수 있다.

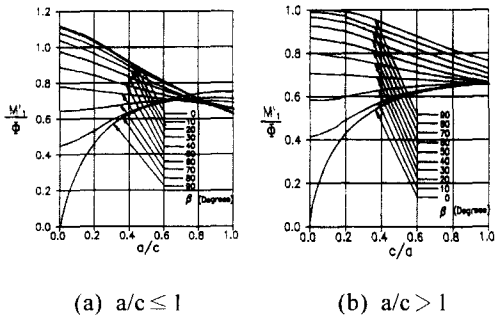


Fig. 6 Normalized factor $\frac{M_1}{\Phi}$

$$K = F \sigma_o \{ \pi(r+c) \}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

이상의 식 (3), (5)을 함께 놓으면 다음의 식이 얻어진다.

$$K = \sigma_o (\pi a)^{\frac{1}{2}} M_K \left(\frac{c}{r} \right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{a}{c}, \beta \right) = F \sigma_o \{ \pi(r+c) \}^{\frac{1}{2}} \quad a/c \leq 1 \quad (6)$$

$$K = \sigma_o (\pi a)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{1}{2}} M_K \left(\frac{c}{r} \right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{a}{c}, \beta \right) = F \sigma_o \{ \pi(r+c) \}^{\frac{1}{2}} \quad a/c > 1$$

식 (6)을 F에 대해 정리하면 다음과 같다.

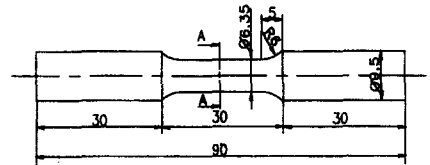
$$F = (a)^{\frac{1}{2}} M_K \left(\frac{c}{r} \right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{a}{c}, \beta \right) / \{ (r+c) \}^{\frac{1}{2}} \quad a/c \leq 1 \quad (7)$$

$$F = (a)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{c}{a} \right)^{\frac{1}{2}} M_K \left(\frac{c}{r} \right) \frac{M_1}{\Phi} \left(\frac{a}{c}, \beta \right) / \{ (r+c) \}^{\frac{1}{2}} \quad a/c > 1$$

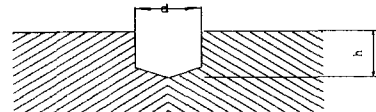
이상에서와 같이 구한 응력 확대 계수를 응력 집중원으로부터 발생되어 전파되는 균열에 대하여 적용할 수 있는가를 검토하기 위하여

회전 굽힘 시험을 실시하였다. 사용된 시험기는 미국 SATEC 사에서 제작한 것으로 최대 용량은 23N·M이고, 최대 회전 속도는 10,000 rpm이다. Fig.7은 본 실험에 사용된 시편의 형상과 치수를 나타낸 것으로, 미소 drill을 사용하여 시편 중앙에 직경(d) 500 μm, 깊이(h) 500 μm인 1개의 인공 미소 결함을 가공하였다.

한편 표면 균열은 배율이 100배, 200배, 500배로 조정될수 있는 이동식 현미경을 사용하여 시편이 시험기에서 분리되지 않은 상태에서 관찰하였으며, 대안 렌즈에 OSM (Ocular Shift Micrometer)을 부착하여 균열 길이를 측정하였다. 측정시 초기 미소 균열은 500X 배율로 관찰하였고, 500 μm이하의 균열은 200X 배율, 그리고 500 μm이상의 균열은 100X 배율로 측정하였다.



(a) Specimen for rotary bending fatigue test



(b) Detail of section A

Fig. 7 Illustration of rotary bending test specimen

Fig.8은 식 (7)을 이용하여 상기 시편에 대한 $dc/dN - \Delta K$ 의 관계를 구한 결과로, 이들의 관계는 다음과 같은 식 (8)의 Paris 식으로 정리되었고, Fig.8에서 $A=4.2 \times 10^{-10}$, $m=2.8$ 이 되었다. 따라서 식(7)은 응력 집중원으로부터 발생되어 전파되는 초기 균열에 대한 파괴 역학적 해석에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{dc}{dN} = A (\Delta K)^m \quad (8)$$

3.3 결함이나 균열 사이의 간섭 효과

Fig.9는 결함인 미소 원공간 간격이 변함에 따라 응력의 상승 효과를 나타내는 간섭 영향을 응력 간섭계수(γ)로 정리한 결과이다. 여기

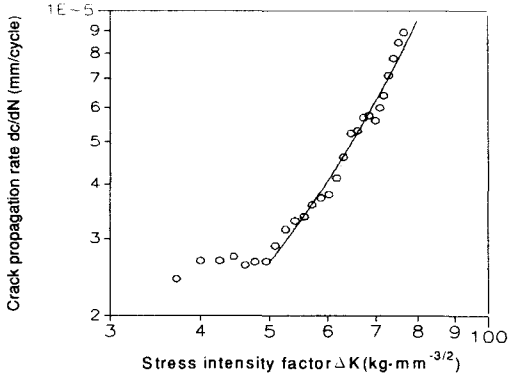


Fig. 8 Relation between the crack propagation rate and stress intensity factor($d=500\mu m$)

서 γ 는 서로 마주하는 결함이 인접하거나 원 접할 때 B점에서의 응력 집중 계수를 결함 1개가 독립적으로 있을 때의 초기 응력 상태에 대한 응력 집중 계수로 나눈 것으로 최대 응력점의 간섭 정도를 나타내는 변수이다. 즉 $\gamma=1$ 인 경우는 두 결함 사이의 최대 응력점인 B가 C-D 사이의 결함에 의해 분포되는 응력장에 의한 간섭을 받지 않는 것을 의미한다.

Fig.9의 결과에서, 결함의 반경이 일정하고 깊이가 깊어지면(h/r 증가) 응력의 간섭이 발생하는 간격(e)은 증가한다. 한편 h/r 이 같을 경우, 마주 보는 결함의 직경 차이에 따른 응력의 간섭 효과는 다음과 같다. 동일 직경의 결함이 있을 경우보다 두 결함간 직경의 차이가 있을 때는, $h/r=1$ 인 경우에 간섭 영향 계수(γ)는 작지만, $h/r\geq 2$ 인 경우에는 결함간 간격 e 가 0.25이하의 범위를 제외하고는 크기가 다른 결함들이 마주하고 있을 때의 γ 가 더 크게 된다. 한편 결함 사이에서 응력의 간섭이 발생하는 간격(e)은 $h/r=1$ 인 경우 마주하는 결함 간 크기의 차이에 무관하게 1 이하, $h/r=2$ 인 경우는 동일 크기의 결함 사이에서는 1.5~2 이하, 그리고 크기가 다른 결함이 있을 때는 3 이하가 된다. 한편 $h/r=4$ 인 경우에 이 간격은 동일 크기의 결함에 대해서는 3 이하가 되고, 크기가 다른 결함이 있을 때는 4 이상이 된다.

한편 식 (7)을 이용하여 응력 집중원인 미소 원통형 결함으로부터 발생된 균열 사이의 간섭

영향을 검토한 결과는 Fig.10, Fig.11과 같다. 이들 결과에서 F_I 의 하점자 γ_1 는 Mode I 균열에 대한 무차원 응력확대계수를 나타내고 있다.

Fig.10은 1 개의 원공으로부터 발생되어 전파하는 구석 균열의 표면 방향(B-B', A-A')으로의 F_I 에 대한 결과이다. 여기서 ●로 나타낸 값은 Bowie⁽¹¹⁾가 1축 인장상태의 평판에 있는 관통 원공으로부터 발생된 균열에 대한 F_I 을 구한 결과이고, 그 밖의 값은 미소 원통형 표면 결함에 대하여 h/r 변화에 따른 F_I 의 해석 결과이다. 이들 결과에서 $h/r\leq 1$ 인 경우의 F_I 은 Bowie의 해석 결과보다 작고, $h/r=2$ 인 경우의 F_I 은 다소 차이는 있지만 Bowie 모델과 유사하며, $h/r=4$ 인 경우는 Bowie 모델보다 큰 것을 알 수 있다.

한편 균열 선단의 평균 응력이 결함에 의한 평균 응력 분포에 지배되는 범위는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 결함 선단으로부터 F_I 이 최대가 되는 지점까지로, h/r 이 0.5에서 4까지 증가함에 따라 이 범위는 $x/r\leq 1.6, 1.9, 2, 2.1$ 가 됨을 알 수 있다. 즉, 응력 집중원인 결함으로부터 발생하는 균열의 전파 거동은 결함 선단 형상에 따른 평균 응력장의 분포 형태에 의하여 지배되며, 본 연구에 적용된 결함의 경우에는 h/r 의 비에 따라 다소 차이가 있지만 $x/r=2$ 부근을 기점으로 균열이 그 이상으로 전파하게 되면 균열 선단의 평균 응력은 응력 집중 원에 의해 분포되는 평균 응력의 영향을 받지 않게 된다.

Fig. 11(a)는 $h/r=2$ 인 동일 크기의 결함간 간격이 변할 경우의 F_I 으로, 원공선단 B를 기점으로 전파되는 균열에서 B-B'구간의 값을 나타낸다. 결함간 간격 $e=2$ 와 $e=4$ 인 경우의 F_I 은 거의 근접하게 됨으로 $e>2$ 인 범위에서 발생된 초기 균열간의 간섭 영향이 소멸된다. 아울러 균열길이가 증가할수록 동일 균열 길이(x/r)에서의 F_I 은 결함간 간격이 근접할수록 더욱 증가하게 되는데, 이는 균열 선단간 간격이 근접할수록 균열 선단 주위 응력의 중첩에 의한 간섭 형상의 증대로 균열 전파가 가속화되기 때문이다.

Fig. 11(b)는 $h/r=4$ 인 동일 크기의 결함간 간격이 변하는 경우에 대하여 F_I 을 해석한 결과이다. $h/r=4$ 인 경우의 F_I 을 $h/r=2$ 인 경우와 비

교하면, 결함 깊이가 증가함에 따라 결함 주위 응력이 증가하기 때문에 $h/r=4$ 인 경우의 F_1 은 증가하며, $e=1$ 인 경우와 $e \geq 2$ 인 경우에서 F_1 의 차이는 $h/r=2$ 인 경우보다 $h/r=4$ 인 경우가 크게 된다.

이상에서 하중 방향에 수직한 동일 축 상에 위치한 결함들 사이의 초기 응력 분포에 따른 응력 간섭 효과와 이들 결함으로부터 발생되어 전파되는 균열 사이의 간섭 영향을 무차원 응력 확대 계수로 비교한 결과는 다음과 같다. $h/r=2$ 인 경우 동일 크기의 결함 사이에서 초기 응력 분포에 따른 간섭 효과가 발생하는 결함 선단 사이의 간격 e 는 1.5~2 이하가 되었고, 동일 형태로 분포된 결함에서 균열이 발생될 경우 균열 길이에 상당하는 지점에서 무차원 응력 확대 계수 비교에 의한 초기 균열의 간섭 효과가 발생하는 결함 선단 사이 간격 e 는 2 이상이 되었다. 즉 응력 집중원인 결함에서 균열이 발생되었을 때 이들 초기 균열에 의해 간섭이 발생하는 결함 간 간격은 균열이 발생되지 않았을 때의 초기 응력에 대하여 최대 응력 비교로 구한 간섭 간격보다 다소 크게 되는 것을 알 수 있다.

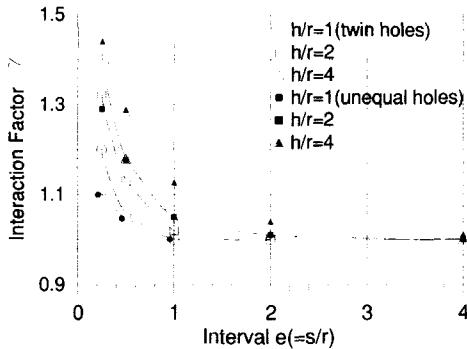


Fig. 9 Comparison of effects of micro holes spacing e on stress concentration factor for twin($r_2=r$) and unequal micro holes($r_2 = 2r$)

4. 결론

미소 원통형 결함이 응력 집중원으로 거동할 때 미소 결함으로부터 발생되어 전파되는 균열에 미치는 응력장의 영향을 규명하고, 이들이 인접하거나 원접하여 있는 결함으로부터 균열이 발생될 경우에 대한 간섭 효과를 응력 분포와 무차원 응

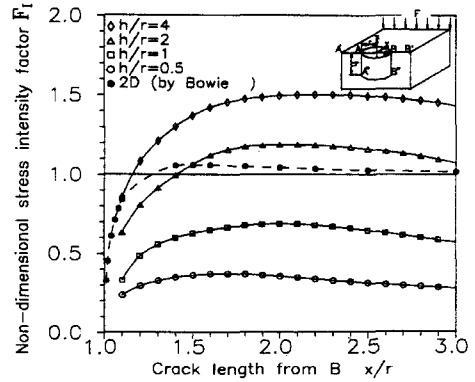
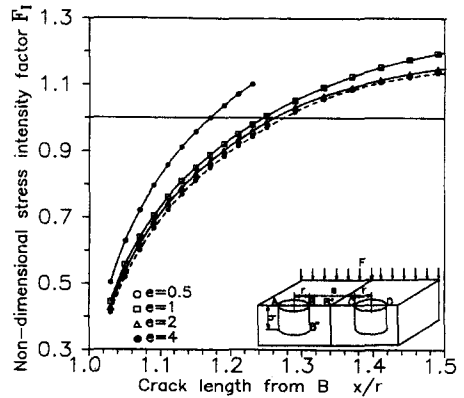
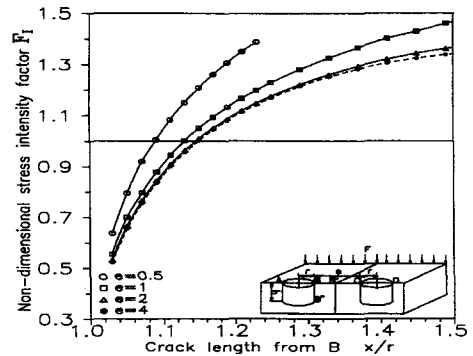


Fig.10 F_1 around a crack emanating from a hole



(a) $h/r=2$



(b) $h/r=4$

Fig.11 F_1 between cracks emanating from twin holes ($e=s/r=4, x=radius + crack length$)

력 확대 계수로 고찰하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 응력 집중원으로부터 발생되어 전파되는 균열 선단은 응력 집중원에 의한 응력장(場)의 영향을 받게 되며, 이때의 응력장은 결함이나 균열에 의해 생성되는 초기 응력장보다는 이들의 평균 응력장에 의해 지배된다.

(2) 결함 깊이 대 반경의 비(h/r)가 증가할수록 응력의 간섭이 발생하는 결함 간 간격은 증가하며, 두 결함간 직경의 차이가 있을 때, $h/r=1$ 일 경우는 동일 직경의 결함이 있을 경우보다 결함간 간섭 영향 계수(γ)는 작지만, $h/r \geq 2$ 인 경우에는 결함간 간격(e)이 0.25 이하의 매우 작은 범위를 제외하고는 크기가 다른 결함들이 있을 때의 γ 가 더욱 크게 된다.

(3) 응력 집중원인 결함으로부터 균열이 발생되었을 때 이들 균열에 의해 간섭이 발생하는 결함간 간격은 균열이 발생되지 않았을 때의 초기 응력에 대하여 최대 응력분포를 비교하여 구한 간섭 간격보다 다소 증가된다.

(4) 본 연구에서 제시한 평균 응력법에 의한 응력 확대 계수는 응력 집중원인 결함으로부터 발생되어 전파되는 초기 균열에 대한 파괴 역학적 해석에 적용할수 있다.

참고문헌

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 피로 크랙 거동," 대한기계학회논문집, 제 9권, 제2호, 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. 송삼홍, 오환섭, "미소 원공 주위의 피로 크랙 발생 전파 거동에 관한 연구," 제1회 재료 강도 Symposium 초록집, pp. 251-258, 1987.
6. 송삼홍, 김진봉, "미소 결함간의 응력의 간섭과 응력장 해석," 대한기계학회 논문집, 제 19권, 제 5호, 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. Bowie, O. L., "Analysis of an Infinite Plate Containing Radial Cracks Originating at the Boundary of an Internal Circular Hole," J. Math. Phys., Vol. 19, No. 1, pp.60-71, 1956.
12. Newman, J. C. Jr., "A Review and Assessment of the Stress Intensity Factors for Surface Cracks," ASTM687, pp. 16-42, 1979.
13. Liu, A. F., "Stress Intensity Factor for a Corner Flaw," Engng. Fracture Mechanics, Vol. 4, pp. 175-179, 1972.
14. 오환섭, "표면 미소 결함을 갖는 저탄소강의 피로 크랙 거동에 관한 연구," 박사학위 논문, 경희대학교, 1985.
15. Irwin, G. R., Fracture, In Handbuch der Physik VI, Springer-Verlag, Berlin, pp. 551-590, 1958.
16. Norio Hasebe and Yasuhiro Kutanda, "Calculation of Stress Intensity Factor," Engng. Fracture Mech., Vol. 10, pp. 215-221, 1978.
17. Williams, J. G. and Isherwood, D. P., "Calculation of the Strain Energy Release Rates of Cracked Plates by an Approximate Method," J. Strain Analysis, Vol. 3, pp.17-22, 1968.
18. Rudd, J. L., Hsu, T. M., and Wood, H. A., "Part-Through Crack Problems in Aircraft Structures," ASTM STP 687, pp. 168-194, 1979.