

〈論 文〉

미소결함간의 응력의 간섭과 응력장 해석

송삼홍* · 김진봉**

(1995년 2월 8일 접수)

A Study of Stress Analysis and Interaction of Stress between Micro Flaws and Inclusions

Sam-Hong Song and Jin-Bong Kim

Key Words : Stress Interaction Effect(응력간섭효과), Fatigue Crack Initiation(피로크랙발생), Inclusion(개재물), Micro Hole(미소원공), Stress Concentration(응력집중), Stress Distribution(응력분포), Singular Stress Field(특이응력장), Young's Modulus of Inclusion(개재물의 탄성계수), Young's Modulus of Matrix(기지의 탄성계수)

Abstract

The stress distribution around micro holes and the behavior of stress interaction between micro holes are considered in the study. Several conclusions are extracted as follows : (1) The stress interaction varies with the distance e between micro holes. When the two micro holes are spaced in such a manner that their two closest points are separated by a distance of micro hole radius ($e=1$), stress distribution is affected by a opposite micro hole in all the closest region. In addition, if two closest points are separated by twice the distance of a micro hole radius ($e=2$), stress distribution is affected by a opposite micro hole in the region of $-0.8 \leq x/r \leq 0.8$ and the interaction effect can be neglected for $e=4$. (2) If the depth becomes larger than the radius, or the radius varies, the shape and magnitude of stress distribution around micro holes varies. (3) Hoop stress around a micro hole for the two dimensional configuration is larger than that of the three dimensional micro hole located on the surface of material for $\theta < 60^\circ$, but it is reversed for $\theta > 60^\circ$.

1. 서 론

결함이나 비금속 개재물은 재료가 갖는 각 부위의 표면 경도값의 대소에 따라 피로균열의 발생 및 전파거동에 미치는 영향은 일정하지 않으나 이것들이 피로균열 발생원이 되는 경우에는 경도값의 대소에 관계없이 이들을 포함한 국부 영역은 응력집중원이

된다.⁽¹⁾ 특히 결함이나 비금속 개재물은 그 크기나 형상에 따라 피로강도의 크기를 좌우할 것으로 예상되나 이들의 크기나 형상을 야금학적으로 제어한 시험편을 제작한다는 것은 상당한 시간과 노력이 요구될 뿐만 아니라 실험의 재현성이 없기 때문에, 연구자들은 결함대신 인공 결함시험편을 가공하여 피로거동을 고찰하여 왔다.^(2,3) 즉, 결함이나 개재물이 피로거동에 어떻게 기여하는가를 규명하기 위해서는, 결함의 기하학적인 형상을 인자로 취급하고, 그것을 포함한 그 주위의 응력분포 및 파괴거

*정회원, 고려대학교 기계공학과

**정회원, 고려대학교 대학원

동을 상세히 고찰하는 것이 바람직하다. 한편, 상기의 결합이나 개재물들이 재료내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고 분포되어 있는 상태도 인접하거나 원접하는 등 다양하다. 이와 같이 다양하게 분포된 결합들 사이의 응력은 이들이 서로 인접하여 있을 경우에는 상호간섭으로 인하여 단독으로 존재할 때와는 다르게 분포되고, 균열발생거동도 다르게 된다. 이에 관련된 연구로서는 결합이나 개재물 사이의 응력장 간섭에 관한 것,^(4,5) 균열사이의 응력확대계수를 구하여 균열의 간섭영향을 구한 것,⁽⁶⁾ Notch나 결합에서 발생하여 전파하는 균열의 전파속도를 실험에 의해 구하여 간섭영향을 구한 것,⁽⁷⁾ 그 밖에 균열들의 간섭과 합체에 의한 균열전파와 수명의 감소를 평가한 것 등⁽⁸⁾이 있다. 이들 연구결과를 종합하면 결합이나 균열이 인접하여 있을 경우 이들 사이의 응력장 간섭에 의하여 특히 응력장이 형성되어 응력확대계수가 급격하게 증가함으로써 피로균열은 서로 빠른 속도로 합체된다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 응력장의 간섭에 따른 초기 균열의 발생 및 전파거동을 파악하기 위해서는 결합이나 개재물 주위의 응력집중, 응력분포 특성 및 응력의 간섭형태를 규명하여야 한다. 그러나 응력집중에 대한 엄밀해는 없기 때문에 2차원 형상에 대한 Neuber의 해석결과⁽⁹⁾를 기초로 하여 작성된 Peterson⁽¹⁰⁾과 西田⁽¹¹⁾의 응력집중 선도가 응력해석에 가끔 이용되고 있다. 그러나 이들 선도는 대부분이 2차원 형상에 관한 것으로서 이것을 3차원 상태로 분포된 결합이나 개재물 주위의 응력분포 및 응력집중에 대한 해석에 적용하는 것은 무시할 수 없을 정도의 오차가 있음이 지적되고 있다.⁽¹²⁾ 그러므로 이러한 오차를 최소화하고 실제 문제에 접근하기 위하여 결합과 개재물의 3차원 형상에 대한 응력분포 및 응력집중을 구하는 방법이 종래부터 부분적으로 연구되어지고 있다. 일례로서, 결합이 재료표면에 있는 경우, 그리고 원통형 결합이 재료표면에 있는 경우⁽¹³⁾에 대하여는 유한요소법,⁽¹⁴⁾ 체적력법 등을 이용하여 해석하고 있다. 즉, 이상과 같은 해석적방법의 대부분은 반구나 반타원형 결합에 국한하여 해석하였는데, 이는 3차원 형상에 대한 탄성이론을 적용하여 해를 구하는 것이 매우 복잡하기 때문에, 이와 같은 해석이 용이한 형태의 모델을 설정하였을 것으로 생각된다. 그러나 이러한 형상에 대한 해석결과는 인공 미소원공재에 대한

연구에 일반적으로 이용되고 있는 드릴의 끝 형상과 같은 형태의 응력해석, 즉 엄밀하게는 원통형 결합의 응력해석에는 적용할 수 없는 문제점을 가지고 있다.

따라서 본 연구자는 우선 재료표면에 원통형 결합이 있는 미소원공재에서 초기균열의 발생 및 전파와 미소결합 주위의 응력분포 및 응력의 간섭효과를 체계적으로 검토하고자 하여 일련의 연구를 수행하여 왔다. 이들 연구의 첫 단계로서 미소결합이 재료표면에 존재하는 경우의 미소피로크랙의 발생전파거동,⁽¹⁵⁾ 미소결합들 사이의 피로크랙발생거동,⁽¹⁶⁾ 그리고 미소결합 주위의 응력분포^(17, 18)가 피로크랙발생 전파와는 어떠한 관련을 갖는가 등에 대한 연구등 몇가지 예들을 고찰하여 왔다. 그러나 미소결합간의 응력의 간섭은 어느정도인가, 미소결합 주위의 응력장의 크기는 미소원공의 대소와는 어떤 관계를 갖는가, 또는 응력집중부에서 발생하는 피로크랙과 응력의 간섭은 어떤 관계를 갖는가, 그리고 피로크랙 선단의 응력장은 어떤거동을 하는가에 대한 해석 등에 대하여는 아직도 이렇다할 결과를 얻지 못하고 있다.

본 연구에서는 상술한 문제점들을 고려하고 재료표면에 인위적으로 가공한 미소결합으로부터의 피로크랙의 발생거동과 그 주위에 발생하는 응력분포 거동, 그리고 이웃하는 미소원공 결합간의 응력의 간섭거동 등에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 유한요소법에 의한 해석모델

미소결합이 존재하는 경우의 해석모델로서는, 단면이 7 mm×7 mm이고 시험편의 길이가 100 mm인

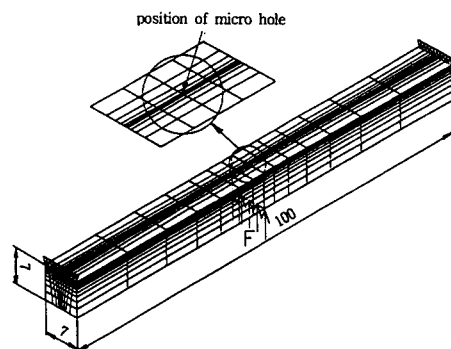


Fig. 1 3D modeling of analysis specimen

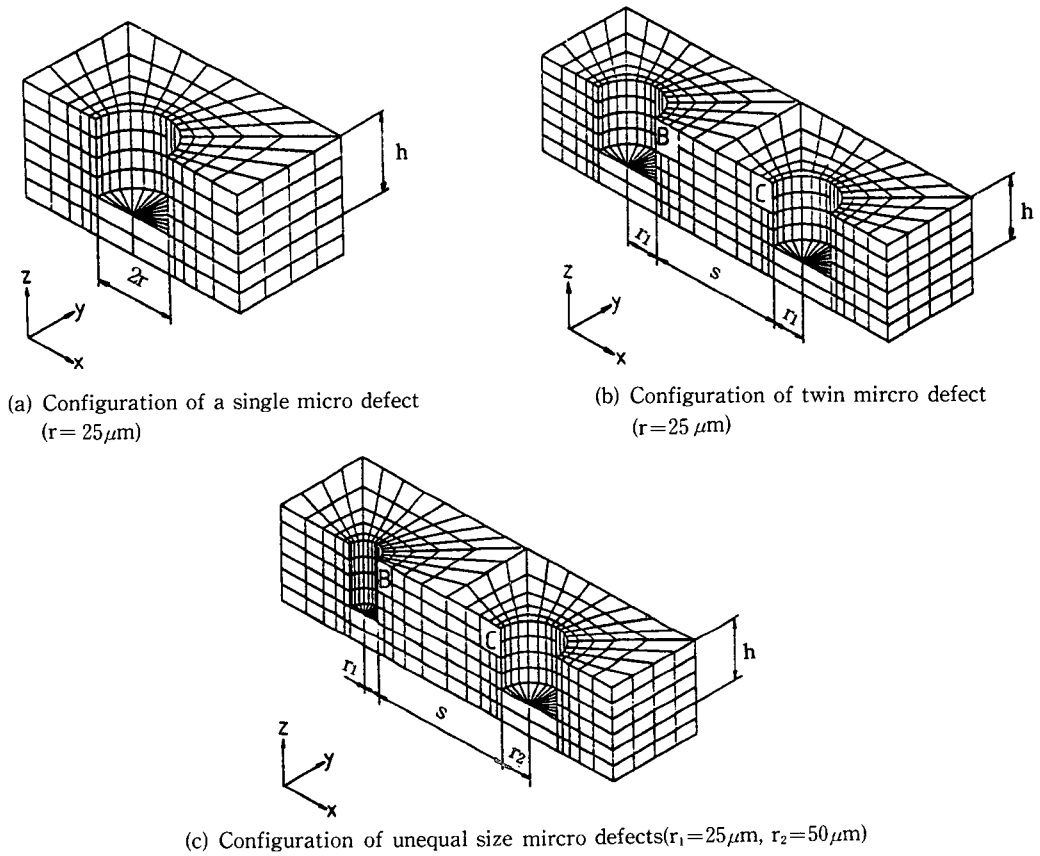


Fig. 2 Analysis model for defects

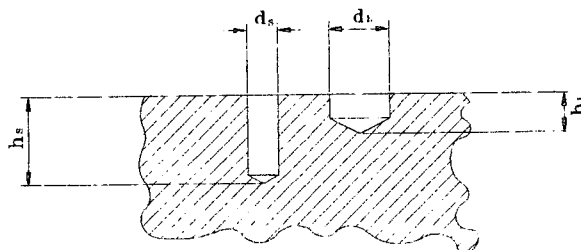
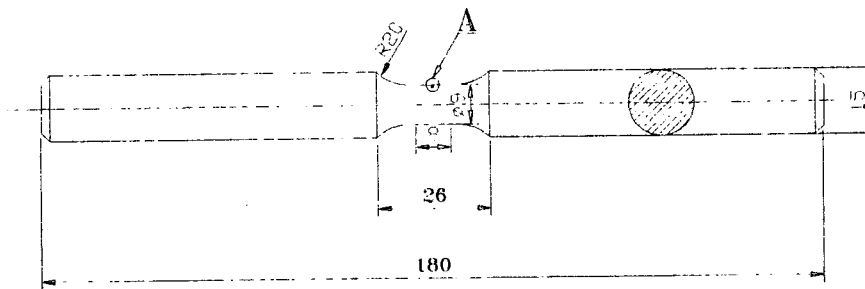


Fig. 3 Illustration of geometry fatigue bending test specimen

사각 단면보의 형태로 하였다. 보의 지지형태 및 하중 방식은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 보의 양단이 단순지지이고 하중은 개재물이나 결함이 위치한 반대편에서 가해지는 3점 굽힘방식이다. 요소분할 시 사각보의 중앙에 개재물이나 결함이 있다고 가정하면 이들을 중심으로 전체 형상은 대칭이 되므로 이들을 포함한 보전체를 2등분하여 응력을 해석하고 미소결함의 형상은 원통형으로 하였다. (Fig. 2)

2.2 실제 실험을 위한 시험편 가공 및 관찰기법
실제로 인공 미소결함을 갖는 시험편의 모양과

치수는 Fig. 3과 같으며 시험편 표면에 가공된 미소 결함으로부터의 피로크랙발생 거동을 상세하게 고찰하기 위하여, 시험편 표면은 전해연마를 실시하여 거울면으로 연마하여 사용하였다.

또, 표면크랙발생은 연속적으로 촬영, 측정하였는데, 관찰시에는 시험편을 시험기에서 분리하지 않고 이동현미경을 실험기에 설치한 채로, 접안이 동축미계를 사용하여 연속적으로 피로크랙발생 거동을 관찰 측정하였다. 본 실험에서 사용한 실험기는 Ono식 회전굽힘 피로시험기이며 회전수는 3000 rpm이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 결함주위의 응력분포

Fig. 4는, 크기가 다른 원접하고 있는 표면결함

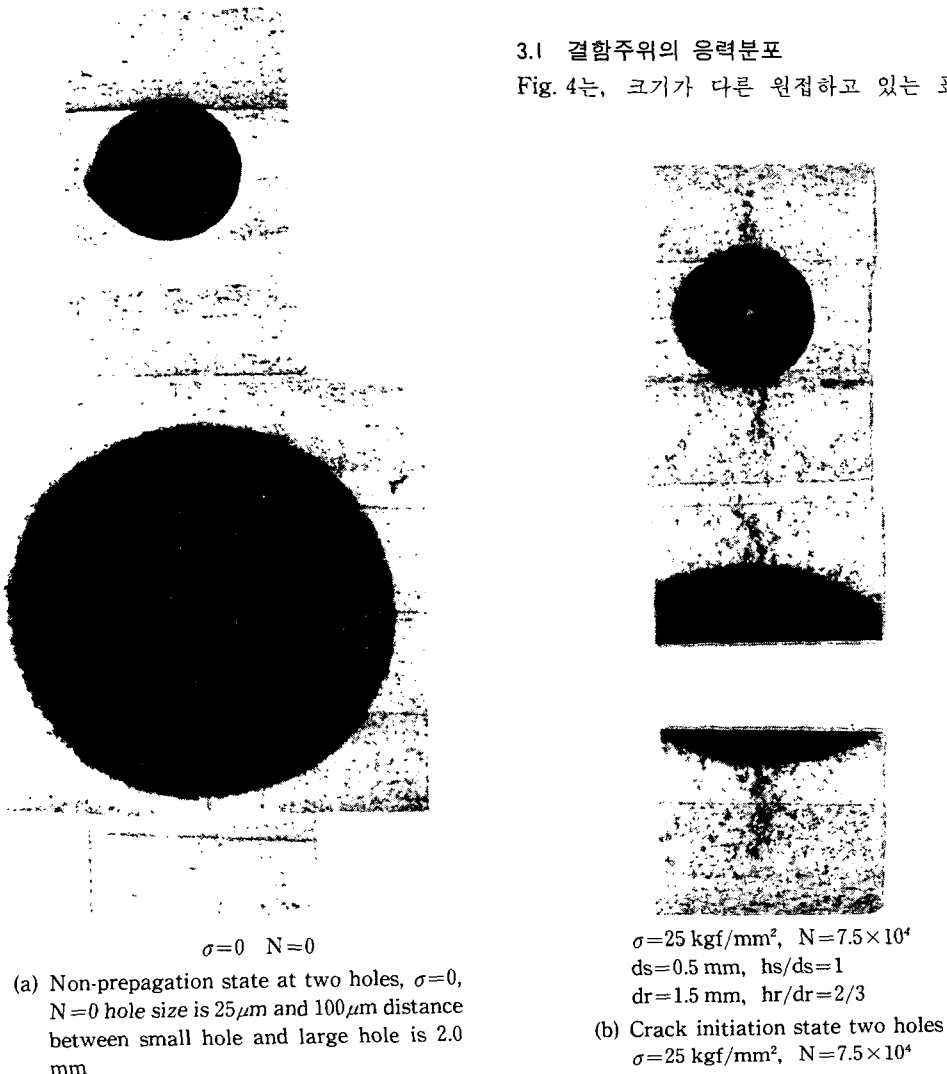


Fig. 4 Illustration of fatigue crack

사이에서 발생하는 피로크랙 초기상태를 나타내는 일 예이다. Fig. 4(a)는 $\sigma=0, N=0$ 상태인 표면 미소결합의 형태이고 Fig. 4(b)는 응력이 반복됨에 따라서 두개의 결합으로부터 각각 피로크랙이 발생한 형태의 일부를 나타낸다.

개재물에 의한 응력집중 및 응력분포를 해석하기 위해서는 (1)개재물의 형상, (2)개재물과 모재와의 밀착력, (3)개재물과 모재의 각각의 탄성계수, 푸아송비, 탄성한도, 열팽창계수 등의 차이, (4)개재물간의 간격, (5)개재물의 크기 등을 고려해야 한다.

본 연구에서는 다음과 같은 인자들을 설정하여 개재물 주위의 모재측의 응력분포를 고찰하였다. 즉 (1)개재물의 형상은 원통형으로 생각한다. (2)개재물과 모재는 완전 접착상태로 생각한다. (3)모재의 탄성계수(E_M)가 개재물의 탄성계수(E_I)보다 큰 경우에 대하여 해석하였다. (4)개재물간의 간격은 인접이거나 원접인 경우에 대하여 해석하였다. (5)피로강도에 영향을 주는 한계결함이나 개재물의 크기는 재료에 따라서 다르고, 이러한 개재물이나 결함은 본질적으로 미소크랙의 발생과 관련을 가지므로, 여기에서는 송 등이 연구한 SM15C 구상화재의 한계 크랙길이의⁽¹⁹⁾ 발전기용 로터에서의 개재물의 크기를 고려하고⁽²⁰⁾ 그 크기를 $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 로 하였다.

한편, Fig. 5는 동일크기의 개재물 2개가 존재하는 경우, 이들사이의 응력분포 성분중 y 성분(σ_y)을 공칭응력 σ_0 로 나누어 나타낸것이다.

이 결과는 개재물 깊이(h)에 대한 반지름(r)의

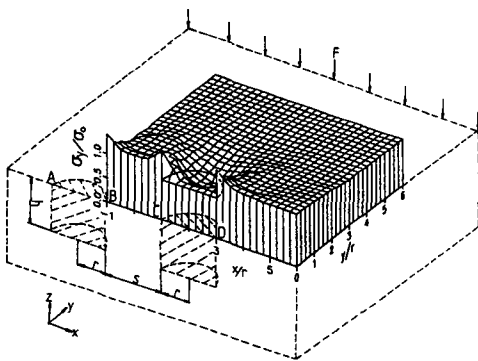
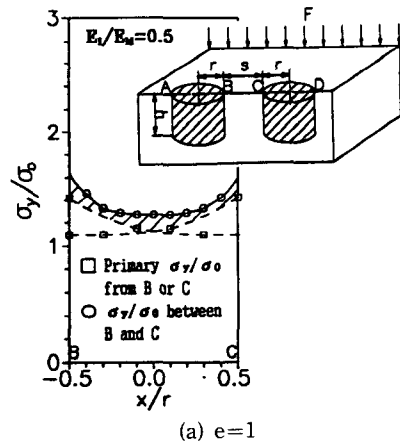


Fig. 5 σ_y distribution around inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=0.5$; A-B, C-D, E_I ; elasticity modulus of inclusion, E_M ; elasticity modulus of base material, σ_0 ; nominal stress)

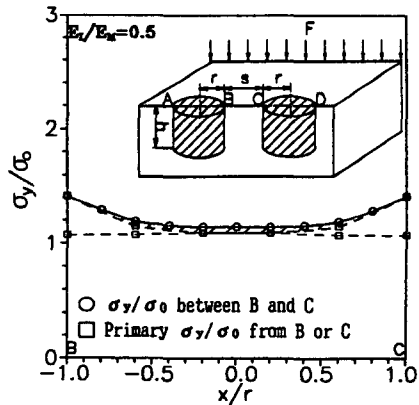
비(h/r)가 2인 경우이고, 개재물 간격 ($e=(s/r)$)가 2인 경우에 개재물 상부 표면주위에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 이것은 A-B사이의 개재물의 탄성계수는 0이고, C-D사이의 개재물의 탄성계수는 개재물이 탄성계수 E_I , 기지조직이 탄성계수 E_M 이라 할때, $E_I/E_M=0.5, e=2$ 인 경우의 응력 분포이다. 여기에서 $E_I/E_M < 1$ 인 경우 개재물의 y 성분의 응력 σ_y/σ_0 는 1보다 크다.

이 결과에서 $E_I/E_M=0$ 인 경우는 개재물의 모재와 완전 분리한 상태이거나 초기결함이 존재하는 상태로 이 경우의 응력집중계수는 현저하게 증가된다고 생각된다.

한편, 동일조건에서의 σ_x/σ_0 및 σ_z/σ_0 의 응력분포는 σ_y/σ_0 와 비교하면 그 형태와 크기는 다르게 나타난다는 것을 관찰 할 수 있었다.



(a) $e=1$



(b) $e=2$

Fig. 6 σ_y distribution of IT₀₅ between inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=0.5$; A-B, C-D, $e=s/r$)

3.2 크기가 같은 2개의 개재물간의 응력의 간섭

Fig. 6(a), (b)는 크기가 같은 2개의 개재물이 있을 경우에 이들 B-C사이에 나타나는 응력의 분포를 나타낸 결과들이다. Fig. 6중에 부호 ○로 나타낸 것은 두 개재물 사이의 응력분포이고, 부호 □로 나타낸 것은 두 개재물의 탄성계수와 크기가 같은 1개의 개재물에서의 독립된 응력분포를 나타낸 것으로서, 그것은 각각 B점과 C점을 기점으로 x/r 축상의 동일위치상에 나타내었다. 그리고 빗금친 부분은 각 개재물의 독립된 응력분포와 2개의 개재물이 인접하였을 때 형성되는 응력분포와의 차이를 나타낸 것으로써 이는 두 개재물사이의 응력 간섭 영향을 나타낸 것이다. 따라서 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 미소결함간의 거리가 각각 $e=1, 2$ 인 경우를 나타낸다.

Fig. 6에서 결함간의 거리 $e=1$ 인 경우는 B-C의 전구간에서 σ_y 의 간섭효과가 나타나고, $e=2$ 인 경우에는 $-0.8 \leq x/r \leq 0.8$ 인 범위에서 간섭효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 미소원공 사이의 거리가 변화함에 따라서 응력의 간섭영향은 다르다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 미소원공간의 응력의 간섭은, σ_x/σ_0 및 σ_y/σ_0 인 경우에도 발생하고 그 값은 약간씩 다르다.

3.3 미소원공의 대소와 응력분포 거동

미소원공의 깊이나 직경의 변화에 따라 응력분포가 변화할 것이 예상되고, 따라서 피로균열의 발생 거동은 변화할 것으로 예상되어 이들을 변화시키면서 1개의 미소원공 주위의 응력분포를 구한 결과를 Fig. 7에 나타냈다.

원공이 1개가 있는 경우의 응력거동은 미소원공의 중심을 보의 중심과 일치하게 놓고 관찰하였다. 각 해석결과는 원공의 중심을 기준으로 좌우 대칭임으로, x 축의 +방향(B-B', B-B'')의 응력분포에 대한 결과만을 고찰하였다. (Fig. 7(a) 참조)

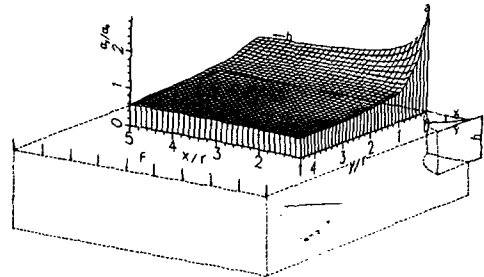
Fig. 7은 σ_y/σ_0 의 응력분포를 나타낸 것으로서, $y=0$ 인 x 축상의 σ_y/σ_0 의 분포형태는 $x/r=1$ 인 y 축상의 σ_y/σ_0 보다 완만한 것을 알 수 있다. (Fig. 7의 (b) 참조)

그리고, $y=z=0$ 인 x 축상의 B-B'의 σ_y/σ_0 분포는 h/r 증가할수록 그 크기는 증가하면서 기울기도 증가하여 응력집중 정도는 증가한다. $x/r \leq 1.5$ 인 범위에서는 2차원인 경우와 마찬가지로 $h/r \leq 2$

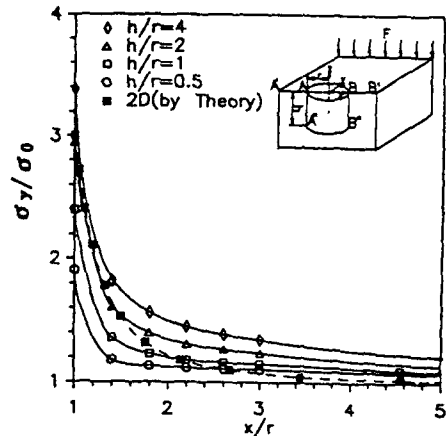
인 경우의 σ_y/σ_0 분포는 거의 같음을 알 수 있다.

한편, Fig. 8은 h/r 이 0.5에서 4까지 변화할 경우에 B-B''사이의 σ_y/σ_0 의 응력분포 형태를 나타내는 것으로서, 미소원공이 지름에 비하여 그 깊이가 깊어질수록 또, 미소원공이 지름이 변화할수록 응력분포의 모양과 크기는 변화하고 있음을 나타내는 일예이다. 따라서 미소원공 상부표면에서 미소원공주위의 원환응력은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 $\theta < 60^\circ$ 인 범위에서는 3차원 표면 결함의 경우가 2차원 미소원공주위의 원환응력보다 작고, $\theta > 60^\circ$ 인 범위에서의 3차원 표면 결함의 경우가 2차원 미소원공 주위의 그것보다 크게 됨을 알 수 있다. 2차원 미소원공의 경우 $\theta=60^\circ$ 인 경우에 원환응력이 0이 되는 특이점이 존재하게 된다.

3차원 결함의 경우, 원환응력 σ_θ/σ_0 이되는 특이점은 반구 핏트의 경우에 대하여 구한 결과에서는 $\theta < 60^\circ$ 인 점에서, 본 연구의 경우는 $\theta > 60^\circ$ 인 점에서

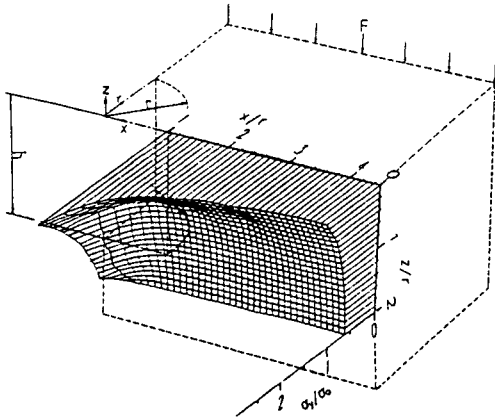


(a) Distribution of σ_y/σ_0 on the upper surface of a hole($h/r=2$)

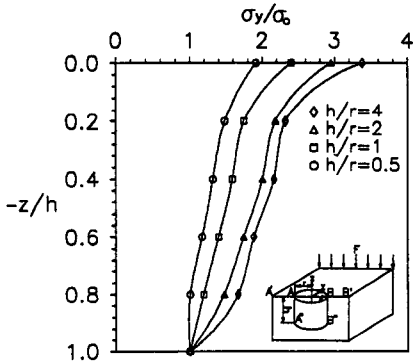


(b) Distribution of σ_y/σ_0 along the x axis A-A' or B-B'

Fig. 7 Distribution of σ_y/σ_0 around a hole



(a) Distribution of σ_y/σ_0 from the upper surface to the z direction



(b) Distribution of σ_y/σ_0 along the B-B' or A-A''

Fig. 8 Distribution of σ_y/σ_0 along the z-direction

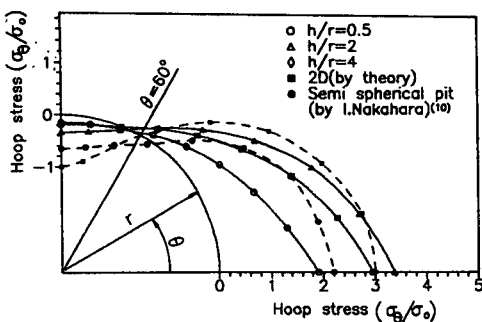


Fig. 9 Distribution of hoop stress on the upper surface of a hole

서 특이점이 존재하는 것으로 해석되었다. 그리고 $\theta < 60^\circ$ 인 경우 h/r 이 증가하면 σ_θ/σ_0 는 증가하게 되나, $\theta > 60^\circ$ 에서는 이와는 반대로 h/r 의 증가에

따라서 σ_θ/σ_0 는 감소하게 된다. 이와 같은 원환응력은 미소원공 주위의 응력집중계수를 바로 알 수 있을 뿐만 아니라 미소원공 주위의 임의 위치에서 전위나 다른 결함들이 분포되어 있을 경우, 이들 사이의 에너지해방률이나 응력의 간섭을 규명하는데 유용할 것으로 생각된다.

3.4 미소원공간의 응력의 간섭

피로균열발생 거동에 대한 결함의 응력간섭효과는 결함선단에 인접하여 존재하는 다른 결함과 중심간 거리의 비에 따라서 각각의 결함은 응력장의 독립성을 유지하기도 하고 응력장의 중첩으로 인하여 특이한 응력장을 형성하기도 한다. 이와같이 결함사이의 응력의 간섭효과에 의해 특이응력장이 형성될 경우 피로균열의 발생영역, 발생빈도 및 전파시기는 이에 영향을 받게 된다. 따라서 결함으로서의 미소원공 사이에서 응력의 간섭을 해석하는 것은 자연발생적이거나 미소원공 등 응력집중부에서 발생하여 전파하는 피로균열의 거동을 규명하는데 필수적인 요인이라고 생각된다. 미소원공간의 간격이 $e=4$ 에서 1로 인접함에 따라서 $\sigma_y/\sigma_0 > 1.8$ 구간에서 미소원공의 상부 표면 B-B' 주위의 σ_y/σ_0 의 증가량은 깊이방향 B-B''로의 증가량보다 큰것을 알수있다. 즉 σ_y/σ_0 의 간섭효과는 미소원공 주위의 내부보다는 표면에서 더 크게 된다. 아울러 A쪽의 응력분포는 미소원공들이 인접하여도 거의 변화가 없어서 응력의 간섭이 없게 되므로 B-C사이의 응력분포만을 비교함으로써 미소원공 사이의 간섭영향을 관찰할 수 있었다. Fig. 10은 $h/r=2$ 인 경우에 동일 크기의 미소원공 상부표면에서 미소원공간 간격이 변할 경우, σ_x/σ_0 , σ_y/σ_0 , σ_z/σ_0 의 각 응력분포를 나타낸것이다.

여기에서 미소원공에 의한 응력집중정도는 $y=0$ 인 x 축 상에서는 미소원공이 인접할수록 응력의 크기가 증가하여 응력의 간섭이 현저하게 나타나지만, y 축상에서는 미소원공이 인접하여도 응력 집중 범위는, x 의 경우는 $0 \leq y/r \leq 1$ 구간이고, σ_y 의 경우는 $0 \leq y/r \leq 1.5 \sim 2$ 구간이며, 그리고 σ_z 의 경우는 $0 \leq y/r \leq 1.5$ 구간으로 거의 일정하여 응력의 간섭이 거의 없음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 이용하여 미소원공 사이의 응력의 간섭을 구한 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 두 미소원공사이의 응력은 실선으로 나타내고, 미소원공이 한 개가 있을 때의 독립된 응력장은 파선으로

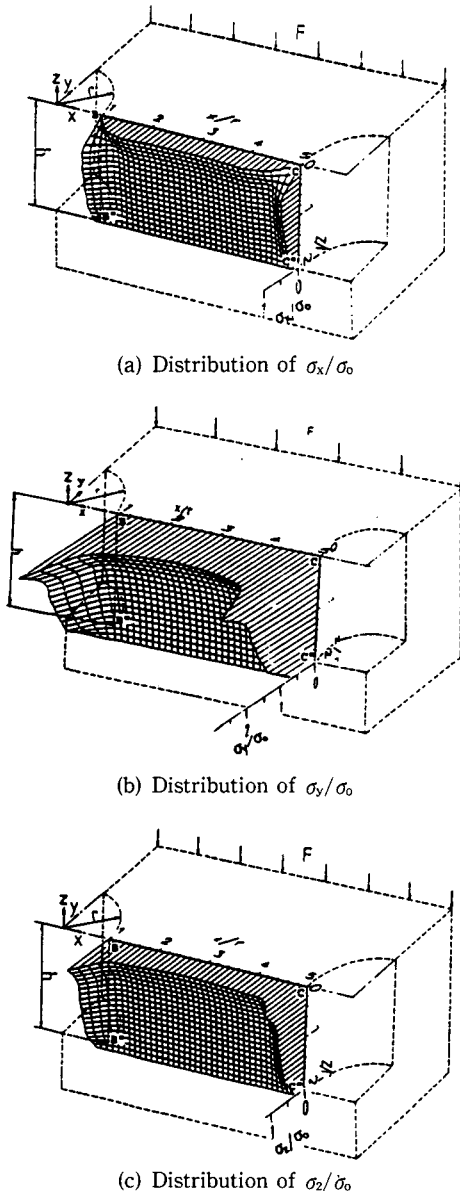


Fig. 10 Distribution of stress at B-C-C''-B'' ($h/r=2, e=s/r=4$)

나타냈다. 이들 빛금 친 부분이 있는 영역을 응력의 간섭이 있는 범위로 하였다. Fig. 11은 특히 y 응력의 간섭을 구한 결과로 미소원공의 간격 $e=4$ 인 경우에는 σ_y 응력이 간섭은 전혀 없고, $e=2$ 인 경우의 σ_y 간섭은 $1.2 \leq x/r \leq 2.8$ 인 구간에서 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

이상과 같은 결과는 두 미소원공간의 σ_x 의 간섭

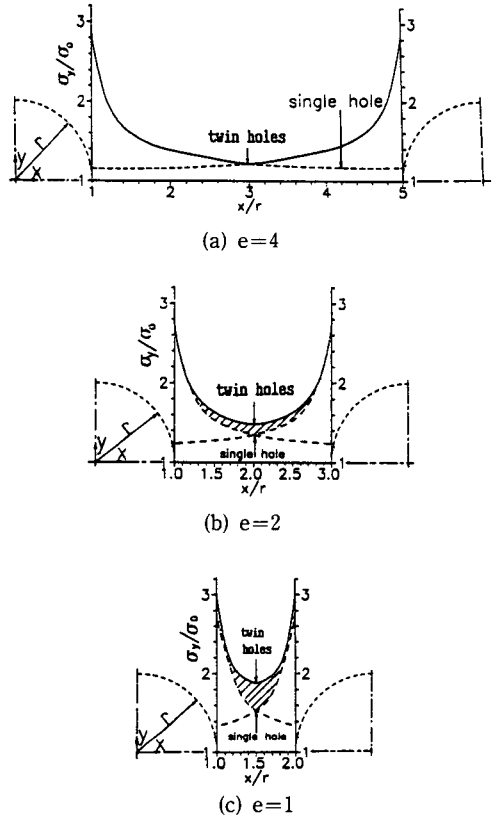


Fig. 11 Comparison of σ_y/σ_0 between twin micro holes(B-C) and single micro hole($h/r=2, e=s/r$)

을 구했을 경우에도, σ_z 의 간섭을 구했을 경우에도 거의 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 동일 크기의 미소원공 사이의 σ_x/σ_0 의 응력의 간섭은 $e=s/r=4$ 인 경우에는 두 미소원공의 중앙부인 $x/r=3$ 주위의 일부분에서만 나타나고 그 이외의 부분에서는 응력간섭은 없고, 미소원공의 간격이 $e=2$ 인 경우는 전범위에서 σ_x 의 간섭은 나타난다. 마찬가지로 σ_x 의 응력의 간섭범위도 σ_y 의 응력간섭범위와 거의 유사하여, $e=4$ 인 경우에는 σ_z 의 간섭이 없으며 $e=2$ 인 경우에도 $1.4 \leq x/r \leq 2.6$ 인 범위에서 σ_z 의 응력간섭이 있으며, $e=1$ 인 경우의 σ_z 의 응력간섭은 미소원공 사이의 전 범위에서 나타남을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 미소결합 주위에 발생하는 응력분포 거동 및 미소원공간의 응력의 간섭거동 등을 고

찰 하였다. 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 미소결합을 중심으로, 모재의 탄성계수 E_M 과 개재물의 탄성계수 E_1 과의 비가 $E_1/E_M > 0$ 인 경우는, 개재물층의 y 성분 응력 σ_y/σ_0 의 값은 1보다 크고, 그 비가 $E_1/E_M = 0$ 인 경우는, 개재물이 모재와 완전 분리한 상태이거나 초기결합이 존재하는 상태로, 그 때의 응력집중계수는 현저하게 증가한다.

(2) 미소원공간 응력의 간섭은 미소원공간의 거리 e 가 변화함에 따라서 다르고, 그 간섭영향은 결합간의 거리 $e=1$ 인 경우는 전 구간에서 나타나고, $e=2$ 인 경우는 $-0.8 \leq x/r \leq 0.8$ 인 범위에서만 나타난다. 그러나 $e=4$ 인 경우에는 응력의 간섭영향은 나타나지 않는다.

(3) 미소원공의 지름에 비하여 그 깊이가 깊어질수록, 또는 그 지름의 크기가 변화할수록 그 주위에 발생하는 응력분포의 모양과 크기는 변화한다.

(4) 미소원 공주위의 원환응력은 $\theta < 60^\circ$ 인 범위에서는 3차원 표면 결합의 경우가 2차원 표면결합의 그것보다 작고, $\theta > 60^\circ$ 인 범위에서는 3차원 표면결합의 그것은, 2차원 결합의 그것보다 크다.

후 기

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME93-C-07)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

(1) 宋森弘, 國尾, 1974, “高硬度鋼のミクロ領域における疲労き裂生成過程,” 日本機械學會論文集, Vol. 40, No. 334, p. 1503.
 (2) Brooksank, D. and Andrews, K. W. 1972, “Stress Fields Around Inclusion and Their Relation to Mechanical Properties,” *Journal Iron & Steel Inst.*, p. 246.
 (3) Trantina, G. G. and Barishpolysky, M. 1984, “Elastic-Plastic Analysis of Small Defect Void and Inclusion,” *Engineering Fracture Mech.*, Vol. 20, No 1, p. 1.
 (4) 西谷弘信, 1968, “Notch 干涉效果の近似計算法とその應力,” 日本機械學會誌, 第71卷 第589號, p. 35.

(5) Horii, H. 1985, “Elastic Fields of Interacting Inhomogeneities,” *International Journal Solid Structures*, Vol. 21, No. 7, p. 731.

(6) Murakami Y. and Nemat-Nasser, 1983, “Growth and Stability of Interacting Surface Flaws of Arbitrary shape,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 17, No. 3, p. 193.

(7) Heath B. J. and Grandtl. A. F. Jr, 1984, “Stress Intensity Factors for Coalescing and Single Corner Flaws Along a Hole Bore on a Plate,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 4, p. 665.

(8) Roger Chang, 1982, “On Crack-Crack Interaction and Coalescence in Fatigue,” *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, No. 5, p. 683.

(9) Neuber, H., 1957, *Theory of Notch Stresses*, Springer, Berlin.

(10) Peterson, R. E., 1962, *Stress Concentration Desing Factors*, John Wiley & Sons.

(11) 西田, 1973, “應力集中,” 森北出版.

(12) 齊藤憲司, 中原一郎, 1973, “半球ピットを有する半無限體の1軸引張り,” 日本機械學會論文集, 第33卷 第247號, p. 343.

(13) 村上敬宜 外2人, 1983, “軸對稱形表面ピットを有する半無限體の2軸引張りにおける應力集中,” 日本機械學會論文集, 第48卷, 第426號, p. 150.

(14) 野口, 西谷, 1988, “ドリル穴狀ピットを有する半無限體の引張り,” 日本機械學會論文集, 第54卷 第501號, p. 977.

(15) 송삼홍, 오환섭, 1985, “표면결합에서 발생하는 피로크랙거동,” 대한기계학회논문집, 제9권, 제2호, p. 150.

(16) 송삼홍, 오환섭, 1989, “미소결합을 갖는 탄소강재의 피로파괴거동,” 한국해양공학회지, 제3권, 제2호, p. 601.

(17) Song, S. H. and Kim, J. B. 1992, “Analysis of The Stress Distribution Around Flaws and The Interaction Effects Between Fatigue Crack by FEM,” Processing of The VII International Congress on Experiments, U. S. A. *The Society for Experimental Mechanics International*, Vol. 7, p. 200.

(18) 송삼홍, 김진봉, 1994, “유한요소법에 의한

미소원공 주위의 응력분포해석,” 대한기계학회논문집, 제18권, 제3호, p. 555.

(19) 송삼홍, 윤명진, 1988, “프리크랙과 미소원공재의 크랙성장 하한계조건에 관한 연구,” 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, p. 278.

(20) Song, S. H. and Kang, M. S. 1995, “Thermal-Mechanical Fatigue crack propagation Behavior of a Turbine casing Bolt,” *The First International Symposium on Thermal Stress'95 Japan*, Vol. 1, p. 1