

〈論 文〉

유한요소법에 의한 미소원공 주위의 응력분포 해석
— 결함과 개재물 주위의 응력분포 —

송삼홍* · 김진봉**

(1993년 1월 27일 접수)

Analysis of Stress Distribution Around Micro Hole by F.E.M.

— Stress Distribution around Defects and Inclusions —

Sam Hong Song and Jin Bong Kim

Key Words: Finite Element Analysis(유한요소해석), Inclusion(개재물), Stress Interaction(응력간섭), Stress Concentration(응력집중)

Abstract

This study has been made to investigate the stress distribution around defects and inclusions that behave as stress concentrators. The stress distribution and interation effects around defects and inclusions was analyzed using Finite Element Method. The results are as follows;(1) Maximum stress point in case of $E_i/E_M > 1$ (E_i : elasticity modulus for the inclusion, E_M : elasticity modulus for the base material) is the vertical point with respect to force direction and in case of $E_i/E_M < 1$ it is the parallel point along the hole edge. (2) Interaction effects of σ_y for the inclusion side is larger than the defect side when the interval between inclusion and defect is near. (3) stress interation effects is large if the difference of σ_y is small and it is small if the difference of σ_y is large for the case that the interval between inclusion and defect whose size and property are different is near.

1. 서 론

결함이나 비금속 개재물은 재료가 갖는 기지(基地) 경도의 대소에 따라 피로균열의 발생 및 전파 거동에 미치는 영향은 일정하지 않으나 비금속 개재물이나 결함이 피로균열 발생원이 되는 경우에는 경도의 대소에 관계없이 이들을 포함한 국부 영역이 응력집중원이 된다.^(1~5) 아울러 자연결함이나 비금속 개재물은 그 크기나 형상에 따라 피로강도의 크기를 좌우할 것이 예상되나 이들의 크기나 형상을 야금학적으로 제어한 시험편을 제작한다는 것

은 상당한 시간과 노력이 요구될 뿐만 아니라 실험의 재현성이 없어 자연결함 대신 인공결함을 이용하여 미소 결함재의 특성을 연구하여 왔다. 즉, 결함이나 개재물이 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 피로파괴거동에 대한 결함의 영향을 규명할 수 있다.

한편 상기의 결함이나 개재물들이 재료내에 분포되어 있는 형태나 크기는 다양하고 분포되어 있는 상태도 인접하거나 원점하는 등 다양하다.⁽⁶⁾ 이와 같이 다양하게 분포된 결함이나 균열들 사이의 응

*정회원, 고려대학교 · 기계공학과

**한국전기연구소 발전기 진단 연구팀

력이나 균열전파거동은 이들이 서로 인접하여 있을 경우에는 상호간섭으로 인하여 단독으로 존재할 때와는 다르게 응력이 분포되고 균열전파거동도 다르게 된다. 이에 관련된 연구로서는 결함이나 개재물 사이의 응력장 간섭에 관한 것,^(7,8) 균열사이의 응력 확대계수를 구하여 균열의 간섭영향을 구한 것,⁽⁹⁻¹¹⁾ Notch나 결함에서 발생하여 전파하는 균열의 전파 속도를 실험에 의해 구하여 간섭영향을 구한 것,⁽⁶⁾ 그밖에 균열들의 간섭과 합체에 의한 균열전파 수명의 감소를 평가한 것⁽¹²⁾ 등이 있다. 이들 연구결과를 종합하면 결함이나 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 결함이나 개재물 주위의 응력집중이나 이들의 분포나 간섭형태를 규명하여야 하는데 응력집중에 대한 엄밀해는 없기 때문에 2차원 형상에 대한 Neuber⁽¹³⁾의 해석결과를 기초로 하여 작성된 Peterson⁽¹⁴⁾과 西田⁽¹⁵⁾의 응력집중 선도가 이용되고 있다. 그러나 이들 선도는 대부분이 2차원 형상에 관한 것이고 3차원 문제에서는 단순한 형상에 대한 결과들을 나타냈기 때문에, 3차원 상태로 분포된 결함이나 개재물 주위의 응력분포 및 응력집중에 대한 해석에 적용하는 것은 무시할 수 없을 정도의 오차가 있음이 지적되고 있다.⁽³⁾ 그러므로 이러한 오차를 최소화하고 실제 문제에 근접하기 위하여 결함과 개재물의 3차원 형상에 대한 응력분포 및 응력집중을 구한 연구결과는 크게 실험적방법과 해석적방법으로 구분할 수 있는데 이 중에서 해석적방법에 관한 연구들은 다음과 같다.

해석적방법은 구상(球狀)결함이 재료내에 내재해 있거나 반구상(半球狀)이나 반타원형 pit나 결함이 재료표면에 있는 경우,⁽³⁾ 그리고 원통형 결함이 재료표면에 있는 경우에 대해 유한요소법,⁽²⁾ 체적력법^(16,17) 등을 이용하여 해석하고 있다. 즉, 해석적방법의 대부분은 반구나 반타원형 표면 pit에 국한하여 해석하였는데 이는 3차원 형상에 대한 탄성이론을 적용하여 해를 구하는 것이 매우 복잡하여 해석이 용이한 형태의 모델을 이와 같이 설정하였을 것으로 생각된다.

그러나 이러한 형상에 대한 해석결과는 인공미소

원공재에 대한 연구에 보편적으로 이용되고 있는 drill 형상 즉, 원통형 결함에 적용할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 연구자들은 원통형 결함이 있는 인공미소 원공재에서 초기 균열의 발생과 전파에 미치는 결함과 개재물의 응력분포 거동과 응력의 간섭효과에 대한 규명을 하고자 일련의 연구를 수행하여왔다.^(18,19) 이들 연구의 첫 단계로써 미소결함만이 재료표면에 있는 경우에 이들 사이의 응력간섭에 대하여 해석한 결과를 발표하였으며, 본 보에서는 두번째 단계로 실제 재료중에 내재해 있는 각종 개재물과 결함주위의 모재측에서의 응력분포를 구한 후 이들이 인접하여 있을 경우에 대한 응력의 간섭 영향을 고찰하고 이들 해석결과를 추후 실험을 실시하여 종합적인 상관관계를 정립하고자 한다.

2. 해석모델의 전체 형상 및 경계조건

본 연구에서 해석모델의 형상은 재료내에 개재물이나 결함이 존재하는 경우에 이들을 기점으로 발생하여 성장하는 균열의 거동에 미치는 응력의 영향을 해석하기 위하여 단면이 7(mm)×7(mm)이고 시편의 길이가 100 mm인 사각 단면보의 표면중앙에 개재물이나 결함이 있는 형태로 하였다. 보의 지지형태 및 하중방식은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 보의 양단이 단순지지되고, 하중은 개재물이나 결함이 위치한 반대편에서 가해지는 3점 굽힘방식으로 하였다.

요소분할시 사각보의 중앙에 개재물이나 결함이 있어 이들을 중심으로 전체 형상이 대칭이 됨으로

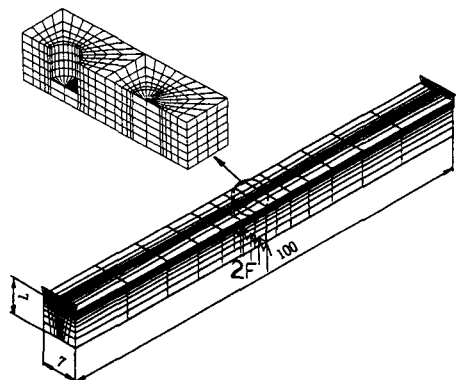


Fig. 1 3D modeling of analysis specimen

Table 1 Symbols of analysis models

Model symbol		Number of inclusion or hole	Radius ratio (r_2/r_1)	Depth/radius (h/r_1)	Interval between inclusion or holes (s/r)	E_I/E_M		Model number
IT series	IT ₀₅	2	1	2	1, 2	all 0.5		1,639
	IT ₂					all 2		
	IT ₀₀₅					0 & 0.5		
	IT ₀₂					0.2 & 5		
ID series	ID ₀₅	2	2	2	1, 2	all 0.5		
	ID ₂					all 2		
						r_1	r_2	
	ID _{s005}					0 0.5		
	ID _{s050}					0.5 0		

이들을 포함한 보 전체를 2등분하여 해석하였으며 개재물이나 결함의 형상은 원통형으로 하였다. 이와 같이 미소 개재물이나 결함의 형상을 원통형으로 한 이유는 다음과 같다. 실제 문제에서 접하게 되는 개재물이나 결함의 형상은 구(球)형, 반구(半球)형, 반타원체나 원통형 등 다양하나, 결함재에 대한 최근의 연구결과 중 미소 drill을 이용하여 인공적으로 결함을 가공한 연구가 행하여지고 있는 것을 고려하여 drill형상의 결함중 drill의 사심(死心 : dead center)의 각도가 180°인 경우로 가정하여 원통형으로 하였다.

해석에 사용된 program은 사용화된 구조 해석 program이고 사용된 요소는 8-node solid이며 절점수는 1,639개였고, 각 해석모델에 대한 기호는 Table 1에 나타냈으며 미소원공과 결함주위의 요소 형태의 대표적인 형상은 Fig. 1의 상부에 나타냈다.

한편 보 전체에 비해 이들의 크기가 매우 작음으로 이를 확대하여 대표적인 형상을 나타내면 다음과 같다. Fig. 2는 개재물의 크기가 같고 깊이($h=0.05\text{mm}$)대 반지름($r=0.025\text{mm}$)의 비(h/r)가 2인 동종(同種) 개재물이 있는 경우로 모재와 개재물의 탄성계수비($E_I > E_M$, E_I : 개재물의 탄성계수, E_M : 모재의 탄성계수)가 각각 0.5($E_I < E_M$)와 2($E_I > E_M$)인 경우를 나타낸 것이고 Fig. 3은 크기가 다른 개재물에 대한 해석 모델이다.

한편 개재물에 의한 응력집중 및 응력분포를 해석하기 위해서는 다음과 같은 인지를 고려하여야 한다. (1) 개재물의 형상, (2) 개재물과 모재의 밀착력, (3) 개재물과 모재의 탄성계수, Poisson비, 탄성한도, 열팽창계수 등의 차이, (4) 개재물간의 간격, (5) 개재물의 크기.

본 연구에서는 이와 같은 인자들을 다음과 같이

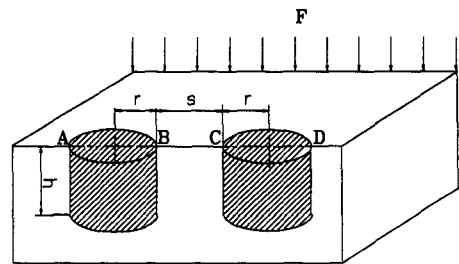


Fig. 2 Analysis model for same size inclusions ($r=25\mu\text{m}$, $h=50\mu\text{m}$, $e=s/r=1$ or 2)

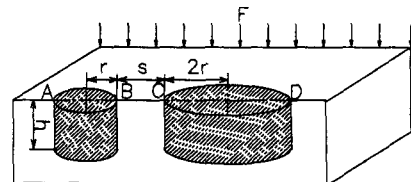


Fig. 3 Analysis model for unequal size inclusions ($r=25\mu\text{m}$, $h=50\mu\text{m}$, $e=s/r=1$ or 2)

설정하여 개재물 주위 모재층의 응력분포를 해석하였다.

(1) 개재물의 형상은 원통형으로 하였다.

(2) 개재물과 모재는 완전 접착상태로 하였다.

(3) 모재의 탄성계수(E_M)는 196 GPa로 하였으며 개재물의 탄성계수(E_I)는 E_M 보다 크거나 작은 경우에 대해 해석하였다. 이들 개재물의 탄성계수(E_I)는 E_M 보다 큰 개재물로서는 Alumina의 값(392 GPa)을, E_I 가 E_M 보다 작은 개재물로서는 sulphide나 calcium aluminate의 값(96 GPa)을 고려하여 $E_I/E_M=2$, $E_I/E_M=0.5$ 로 하였다. 아울러 $E_I/E_M=0$ 이 되는 경우는 개재물이 모재와의 접착성을 상실해 완전하게 박리하거나 분쇄된 상태인 공동(空洞)의 상태이다. 이와 같은 공동인 상태와 $E_I/E_M=2$, $E_I/E_M=0.5$ 인 상태가 혼합해 있는 경우에 대해서도 해석하였다.

(4) 개재물간의 간격은 개재물 사이의 모재층의 응력의 간섭을 고찰하기 위하여 인접하거나 원접하는 경우에 대해 해석하였다.

(5) 피로강도에 영향을 주는 한계 결함이나 개재물의 크기는 모재에 따라 차이가 있다. 미소결함이나 개재물이 피로강도에 미치는 영향은 본질적으로 미소균열의 문제임으로⁽²⁰⁾ 본 연구에서는 송삼홍 등⁽²¹⁾이 보고한 SM15C 구상화재의 한계 균열길이와 발전기용 회전자에서의 개재물 크기 등을 고려하여 개재물의 지름을 50 μm , 100 μm 으로 하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 개재물 주위의 응력분포

Fig. 4~Fig. 7은 동일 크기의 개재물 2개가 존재하는 경우 이들 사이의 응력분포 성분중 y 성분(σ_y)을 공칭응력 σ_0 로 나누어 나타낸 것이다. 이들 결과는 모두 개재물 깊이(h)대 반지름(r)의 비(h/r)가 2인 경우이고 개재물간 간격 $e(=s/r)$ 가 2인 경우에 개재물 상부 표면 주위에서의 응력분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4과 Fig. 5는 A-B사이의 개재물은 탄성계수가 0이고 C-D사이 개재물의 탄성계수 $E_I/E_M=0.5$, $E_I/E_M=2$ 인 경우의 응력분포이다. 이 두 결과에서 $E_I/E_M < 1$ 인 경우에 개재물의 σ_y/σ_0 는 1보다 작으며 모재층 C, D점의 σ_y/σ_0 는 1보다 크게되고 $E_I/E_M=0$ 일 경우에는 σ_y/σ_0 가 2.9로 증가하게 된다. 이와는 반대로 $E_I/E_M > 1$ 인 경우에 개재물의

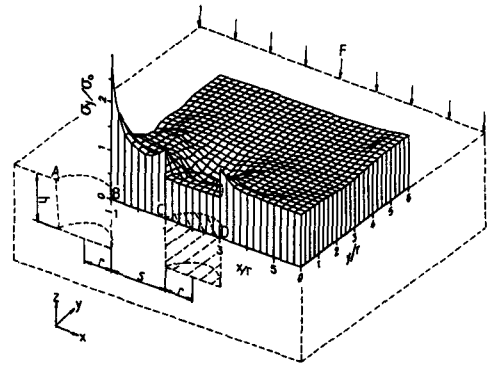


Fig. 4 σ_y distribution around inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=0$; A-B, $E_I/E_M=0.5$; C-D, $E_I/E_M=0.5$; elasticity modulus of inclusion, E_I ; elasticity modulus of base material, E_M ; σ_0 ; nominal stress)

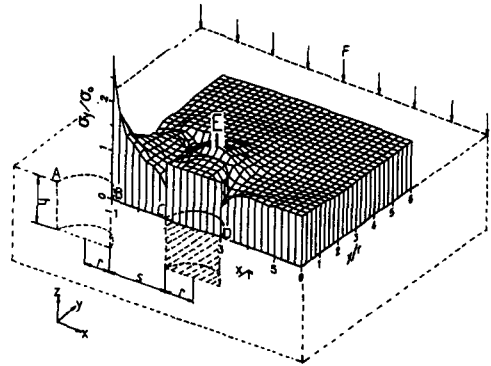


Fig. 5 σ_y distribution around inclusions of the upper surface ($E_I/E_M=2$; C-D, $E_I/E_M=2$; elasticity modulus of inclusion, E_I ; elasticity modulus of base material, E_M ; σ_0 ; nominal stress)

σ_y/σ_0 는 1보다 크며 모재층 C, D점의 σ_y/σ_0 는 1보다 작게 되며, C-D사이 개재물에 접한 원주상에서 모재층인 E점에서의 σ_y/σ_0 가 1보다 큰 것을 알수 있다. 이 두 결과에서 $E_I/E_M=0$ 인 경우는 개재물이 모재와 완전 분리한 상태이거나 초기 결함이 존재하는 상태로 이 경우의 응력집중 계수는 현저하게 증가하게 된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 동일 종류의 개재물이 2개가 있는 경우로, Fig. 6에서 $E_I/E_M=0.5$ 일때 모재층의 최대 응력점은 개재물이 인접한 경우에는 B, C점이고 원접한 경우에는 A, B, C, D점이 되는데, 이 경우 $x/r=0$ 을 기점으로 응력분포는 좌우대칭이 됨으로 B점을 기점으로 좌측의 응력분포는 본 그

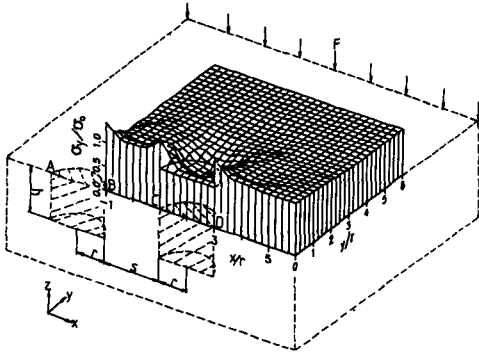


Fig. 6 σ_y distribution around inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=0.5$; A-B, C-D, E_I ; elasticity modulus of inclusion, E_M : elasticity modulus of base material, σ_0 ; nominal stress)

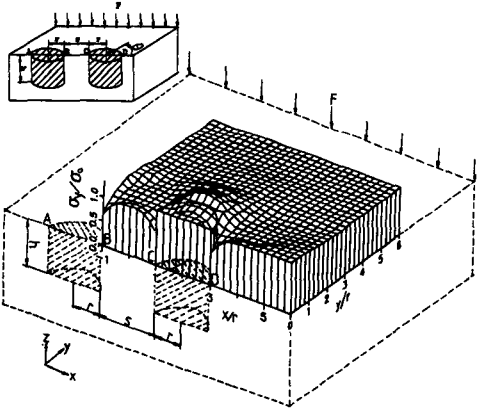


Fig. 7 σ_y distribution around inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=2$; A-B, C-D, E_I ; elasticity modulus of inclusion, E_M : elasticity modulus of base material, σ_0 ; nominal stress)

림에서 제외시켰다. 그러나 Fig. 7에서 $E_I/E_M=2$ 인 경우에 모재측의 최대 응력점은 $y/r=0$ 축 상인 A, B, C, D점이 아닌 개재물의 원점($x/r=-2, 2$)을 기점으로 D나 B로부터 $\theta=\pm 90^\circ$ 가 되는 점에 접한 모재측의 응력이 최대가 된다.

3.2 크기가 같은 2개의 개재물간의 응력간섭

Fig. 8~Fig. 12는 같은 2개의 개재물이 있을 경우에 σ_y 의 간섭효과를 나타낸 결과들이다. 이들 결과에서 부호 \circ 으로 나타낸 실선은 두 개재물 사이의 응력분포이고 부호 \square 으로 나타낸 파선은 두 개재물의 탄성계수와 크기가 같은 1개의 개재물에서

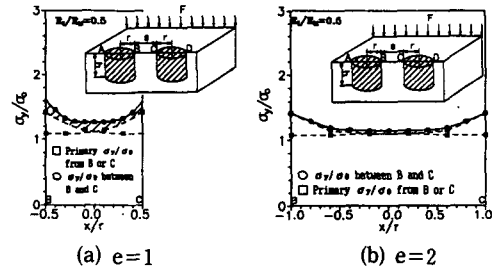


Fig. 8 σ_y distribution of IT_{05} between inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=0.5$; A-B, C-D, $e=s/r=2$)

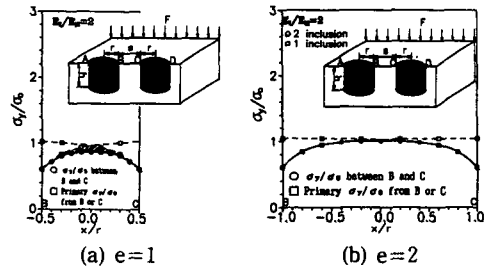


Fig. 9 σ_y distribution of IT_2 between inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=2$; A-B, C-D, $e=s/r=2$)

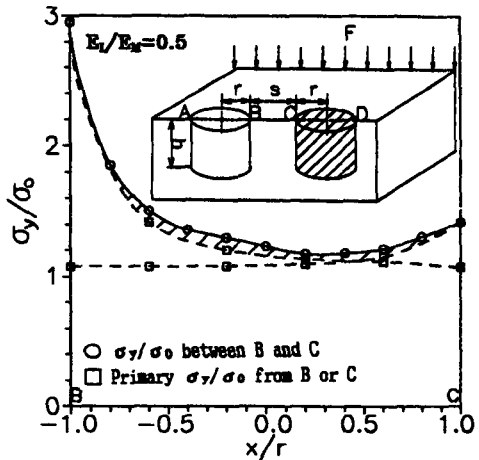


Fig. 10 σ_y distribution of IT_{005} between inclusions on the upper surface ($E_I/E_M=0$; A-B, $E_I/E_M=0.5$; C-D, $e=s/r=2$)

의 독립된 응력분포를 각각 B점과 C점을 기점으로 x/r 축상의 동일 위치상에 나타낸 결과이다. 그리고 빗금 친 부분은 각 개재물의 독립된 응력분포와 2개의 개재물이 인접하였을 때 형성되는 응력분포

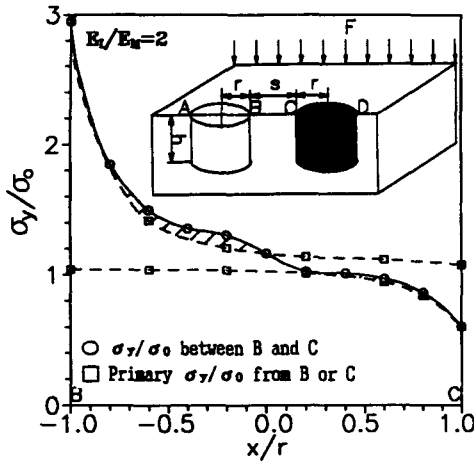


Fig. 11 σ_y distribution of IT_{02} between inclusions on the upper surface ($e=2$, $E_1/E_M=0$; A-B, $E_1/E_M=10$; C-D

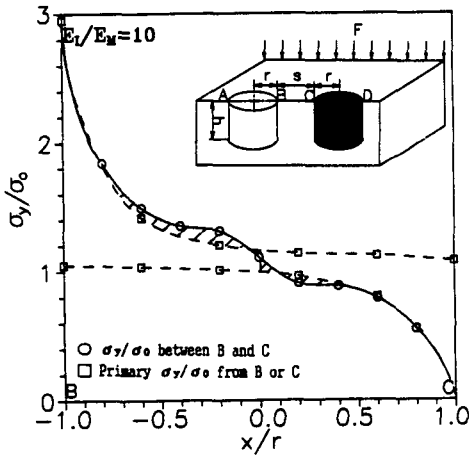


Fig. 12 σ_y distribution of IT_{02} between inclusions on the upper surface ($e=2$, $E_1/E_M=0$; A-B, $E_1/E_M=10$; C-D)

와의 차이를 나타내는 것으로 이는 두 개재물 사이의 응력간섭 영향을 나타내는 것이다.

Fig. 8은 IT_{05} 모델에 대한 σ_y 의 간섭효과로 $e=1$ 인 경우는 B-C 전구간에서 σ_y 의 간섭효과가 있고 $e=2$ 인 경우에는 $-0.8 \leq x/r \leq 0.8$ 범위에서 간섭효과가 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 IT_2 모델에 대한 σ_y 의 간섭효과를 나타낸 것으로 $e=1$ 인 경우 $-0.4 \leq x/r \leq 0.4$ 인 범위에서 간섭효과가 있으며 $e=2$ 인 경우에는 $-0.2 \leq x/r \leq 0.2$ 인 범위에서 간섭효

과가 있어, 이를 Fig. 7의 결과와 비교하면 두 개재물의 E_1/E_M 이 증가하면 응력의 간섭효과는 감소함을 알 수 있다.

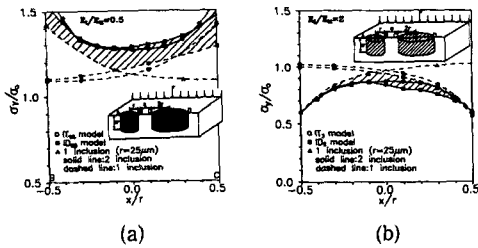
Fig. 10~Fig. 12는 IT_{005} 와 IT_{02} 모델에 대한 σ_y 분포를 나타낸 결과이다. $E_1/E_M=0$ 인 개재물과 $E_1/E_M \neq 0$ 인 개재물이 근접하게 되면 σ_y 의 간섭효과는 IT_{005} 와 IT_{02} 모델 모두 $E_1/E_M=0$ 인 개재물측에서의 간섭효과가 E_1/E_M 인 개재물측의 간섭효과보다 강하게 나타남을 알 수 있다. $E_1/E_M=0$ 측 ($-1 \leq x/r \leq 0$)의 간섭효과는 $e=2$ 인 경우 E_1/E_M 이 0.5에서 10으로 변하여도 (Fig. 10 → Fig. 11 → Fig. 12) 거의 일정하지만 $E_1/E_M \neq 0$ 측 ($0 \leq x/r \leq 1$)은 개재물의 탄성계수에 따라 변하며 $E_1 > E_M$ 인 경우에는 탄성계수비가 증가할 수록 응력의 간섭효과는 모재측의 응력을 점차로 감소시키는 방향으로 나타난다.

3.3 크기가 다른 개재물간의 응력간섭

크기가 다른 개재물 사이에서 일어나는 응력의 간섭효과를 동일 크기의 개재물 사이의 응력의 간섭효과와 비교한 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타냈다. ○으로 나타낸 것은 동일 크기 개재물 사이의 응력분포이고, ■로 나타낸 것은 크기가 다른 개재물에서 크기를 변화시키지 않은 작은 개재물측에서의 응력분포이다. △로 나타낸 것은 크기가 같거나 다른 개재물에서 크기를 변화시키지 않은 개재물에서의 독립된 응력분포이다. 이들 그림에서 실선은 두 개재물 사이(B-C)의 응력분포이고 파선은 개재물이 1개가 있을 경우에 개재물 선단으로부터의 독립된 응력분포이다. 빗금친 부분은 크기가 다른 개재물 사이의 응력과 개재물이 1개 있을 때의 σ_y 의 응력차이로 응력의 간섭이 있음을 나타낸다.

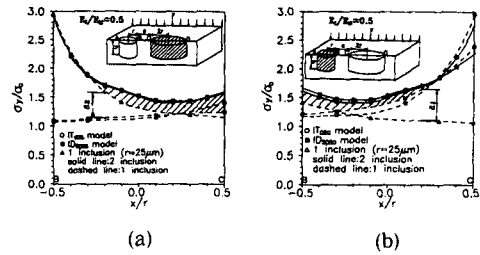
○으로 나타낸 것은 동일 크기 개재물 사이의 응력분포이고, ■로 나타낸 것은 크기가 다른 개재물에서 크기를 변화시키지 않은 작은 개재물측에서의 응력분포이다. △로 나타낸 것은 크기가 같거나 다른 개재물에서 크기를 변화시키지 않은 개재물에서의 독립된 응력분포이다.

Fig. 13은 탄성계수가 같은 개재물 사이의 응력의 간섭효과를 나타낸 것이다. (a)는 $E_1/E_M=0.5$ 인 경우이고 (b)는 $E_1/E_M=2$ 인 경우이다. 여기서, E_1/E_M 인 경우에는 ID_{05} model의 σ_0 가 IT_{05} model의 σ_y 보다 크고, $E_1/E_M=2$ 인 경우에는 개재물에 인접한 일부 영역을 ($x \leq -0.35$, $x \geq 0.35$) 제외하고는,



(a) $E_1/E_M=0.5$ (A-B) and $E_1/E_M=0.5$ (C-D)
 (b) $E_1/E_M=2$ (A-B) and $E_1/E_M=2$ (C-D)

Fig. 13 σ_y distribution between unequal size inclusions on the upper surface ($e=1$)



(a) $E_1/E_M=0$ (A-B) and $E_1/E_M=10$ (C-D)
 (b) $E_1/E_M=0.5$ (A-B) and $E_1/E_M=0$ (C-D)

Fig. 14 σ_y distribution between unequal E_1 and size inclusions on the upper surface ($e=1$)

이와는 반대로 IT₂ model의 σ_y 가 ID₂ model의 σ_y 보다 큰 것을 알 수 있다. 이와 같이 $E_1/E_M=2$ 인 경우에 IT series와 ID series의 응력크기 차이가 $E_1/E_M=0.5$ 인 경우와 반대로 나타나는 것은 응력의 간섭에 의한 응력의 변화가 $E_1/E_M < 1$ 인 경우의 응력증가 요인이 $E_1/E_M > 1$ 에서는 응력감소 요인으로 작용하기 때문이다. 한편 $E_1/E_M=0.5$ 인 경우에 일부 구간에서 ID₀₅의 σ_y 가 IT₀₅보다 크고 ($-0.35 \leq x/r \leq 0.35$), $E_1/E_M=2$ 인 경우에 ID₂의 σ_y 가 IT₂보다 작은 것은 IT series의 응력집중이 ID series보다 국부적이기 때문에 ID series에서의 응력의 간섭영향이 더욱 크기 때문이다. 즉, Fig. 13(a)에서 $r=25 \mu\text{m}$ 인 개재물의 σ_y 분포선과 $r=50 \mu\text{m}$ 인 개재물의 σ_y 분포선을 비교하면 개재물의 반지름이 작을 경우의 응력집중계수는 개재물이 큰 경우의 응력집중계수보다 크지만 응력집중은 더욱 국부적이어서 $-0.35 \leq x/r \leq 0.35$ 인 범위에서는 큰 개재물에 의한 σ_y 가 작은 개재물에 의한 σ_y 보다 크게 되기 때문에 ID series의 σ_y 가 IT series의 σ_y 보다 크게 된다. 아울러 Fig. 13의 (a), (b)에서 σ_y 의 간섭효과는 작은 개재물보다는 큰 개재물측에서 더욱 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 $E_1/E_M=0$ 인 개재물(원공)과 $E_1/E_M=0.5$ 인 개재물 사이의 σ_y 분포를 나타낸 것이다. (a)에서 빗금친 부분은 원공의 반지름인 $25 \mu\text{m}$ 인 개재물과 반지름이 $50 \mu\text{m}$ 인 개재물 사이의 σ_y 응력 분포를 나타낸 것이고 (b)는 원공의 반지름이 $50 \mu\text{m}$ 이고 반지름이 $25 \mu\text{m}$ 인 개재물 사이의 σ_y 의 응력 분포를 나타낸 것이다.

이 두 결과에서 σ_y 의 크기는 Fig. 13의 결과와 마찬가지로 ID series 경우가 크고, σ_y 의 간섭효과

는 원공측보다 개재물측이 강하고 ID₅₀₅₀ 모델보다는 ID₅₀₀₅ 모델이 σ_y 의 간섭효과가 큰 것을 알 수 있다.

이와 같이 ID₅₀₅₀ 모델보다 ID₅₀₀₅ 모델이 σ_y 의 간섭효과가 큰 것은 임의 점에서 간섭을 일으키는 두 응력 사이의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 즉 Fig. 14(a), (b)에서 결함 선단을 기점으로 한 동일 위치의 임의점 ((a) : $x/r = -0.2$, (b) : $x/r = 0.2$ 의 경우)에서 독립된 각 개재물의 σ_y 차이를 ID₅₀₅₀ 모델의 경우는 a_1 , ID₅₀₀₅ 모델의 경우를 a_2 라고 할 때 $a_1 > a_2$ 가 되어 독립된 각 개재물의 σ_y 차이가 작으면 σ_y 의 간섭효과가 크게 된다. 이와 같이 원공에 비해 개재물측의 간섭효과가 크고 각 개재물이나 원공사이의 σ_y 차이의 대소에 따라 간섭효과의 크기가 변하는 이유는 Fig. 15에 의해 설명되어 질 수 있다.

Fig. 15는 ID₅₀₅₀ model에서 개재물과 원공사이의 σ_y 분포 및 개재물과 원공이 각 1개가 있을 때 각각의 응력분포를 a, b, c선으로 나타냈다. 설명을 용이하게 하기 위하여 응력의 기준값을 σ_B ($\sigma_y/\sigma_0=1$)로 하고, 이 σ_B 와 b 응력선과의 차이가 a선에 영향을 주어 응력의 간섭효과를 나타내는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 응력선 c의 c'와 c''의 응력은 각 해당위치의 a, b 선상의 응력 a', b'와 a'', b''의 간섭효과에 의한 값이다. 여기서, c'에서 a, b 응력선의 차이는 $b' - a'$ 이고 c''에서의 a, b 응력선의 차이는 $a'' - b''$ 가 됨을 알 수 있다. 따라서 $b' - a' < a'' - b''$ 가 되어 독립된 응력선의 σ_y 차이가 작으면 σ_y 의 간섭효과가 크게 된다.

이상에서 크기가 다른 같은 종류의 개재물이나 크기는 같은 종류가 다른 개재물들이 인접하여 응

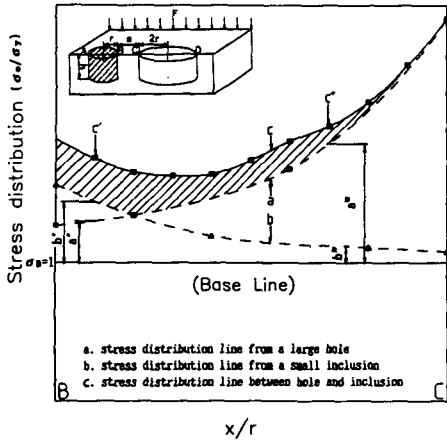


Fig. 15 Interaction effects of stress between inclusions

력의 간섭을 발행하는 경우에 각 개재물 사이의 모재측에서의 응력의 간섭의 정도는 각 개재물의 응력의 집중도 등 응력분포형태에 따라 좌우되며 각 개재물에 의해 분포되는 응력의 차이에도 좌우된다.

Fig. 16은 본 연구에서 구한 결과를 다른 연구자들에 의해 보고된 결과들과 비교한 것이다. 본 연구에서 사용된 원통형 결함이나 개재물을 모델로 하여 보고된 결과가 없기 때문에 본 연구에서 사용된 모델 중 특수한 경우인 $h/r=1$ 이고 동일 크기의 미소결합이 있는 경우의 간섭영향과 이와 형상비가 유사한 타 연구결과를 비교하였다. 이의 비교를 위하여 간섭계수 r 를 이용하였다. 여기서, 간섭계수 γ 는 미소결합 1개가 독립적으로 있을때의 응력집중계수로 미소결합이 2개가 있을때 서로 마주한 미소결합에서 최근점(最近點)의 응력 집중계수를 나눈 것으로 최대 응력점의 간섭 정도를 나타낸 변수이다. 즉, $\gamma=1$ 인 경우는 두 미소결합 사이에는 응력의 간섭이 없는 것을 나타낸다. Fig. 16에서 ○로 나타낸 본 연구의 결과는 $h/r=1$ 인 동일크기의 미소결합 사이의 간섭계수 r 를 나타낸 것이고 □는 Murakami⁽²²⁾가 해석한 반무한체의 표면에 지름이 $2a$ 이고 깊이방향으로 반지름이 c 이고 이들의 비 c/a 가 1인 동일 크기의 반원형 균열 사이의 간섭계수이고, △는 B. J. Heath⁽²³⁾가 hole bore의 축방향으로 위치한 장반경이 a 이고 단반경이 c 인 구석 균열사이의 간섭계수 γ 를 구한 결과이다. Murakami모델의 경우에는 간격 e 가 2이상일 때에 간섭이 없게 되고, B. J. Heath의 경우에

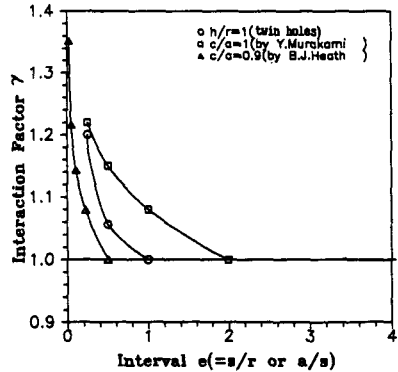
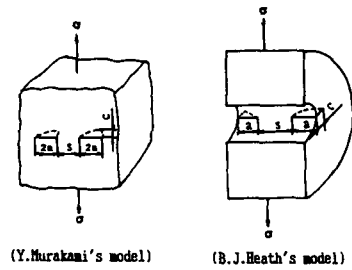


Fig. 16 Comparison of effects of micro holes spacing e on the stress concentration factor with other results

는 균열간 간격 e 가 0.5이상일 때에 간섭이 없게 되며, 본 연구의 결과는 $h/r=1$ 일 경우 간격 e 가 1 이상일 때의 응력의 간섭이 없게되어 Murakami와 Heath가 구한 결과의 중간값이 된다.

4. 결 론

결함이나 개재물의 응력 집중원으로서의 거동을 명확하게 규명하기 위한 모재에 대한 탄성계수의 비(E_I/E_M)가 각각 0, 0.5, 2인 개재물이 있을때 모재측의 응력분포를 구하고 이들간의 상호 간섭효과를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) $E_I/E_M < 1$ 인 경우 최대 응력점은 하중방향에 수직한 개재물 선단에 접한 모재측이고 $E_I/E_M > 1$ 인 경의 최대 응력점은 개재물 선단으로부터 90° 위치에 접한 모재측이다.

(2) 결함과 개재물이 인접하여 있는 경우 σ_y 의 간섭효과는 개재물측이 결함측보다 크다.

(3) 크기가 다른 개재물 사이에서 σ_y 값은 $E_I/E_M < 1$ 경우에는 같은 크기의 개재물 사이의 σ_y 값보다 큰 개재물 주위의 일부 구간을 제외하고는 대부

분 크며, $E_1/E_M > 1$ 인 경우에는 반대로 대부분 작다.

(4) 크기나 종류가 다른 개재물이나 결함들이 인접한 경우에 각 개재물에 의해 분포된 σ_y 의 차이가 작으면 응력의 간섭효과가 크고 σ_y 차이가 크면 응력의 간섭효과는 작아진다.

후 기

이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비지원(과제 번호 : 921-0900-018-2)에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Brooksank, D. and Andrews, K. W., 1972, *Stress Fields around Inclusions and their Relation to Mechanical Properties*, Journal Iron & Steel Inst. pp. 246~255.
- (2) Trantina, G. G. and Barishpolksy, M., 1984, "Elastic-Plastic Analysis of Small Defect-Void and Inclusion," *Engng, Fracture Mech.*, Vol. 20, No. 1, pp. 1~10.
- (3) 濟藤憲司, 中原一郎, 1967, "半球ビットお有する無限體の1軸引張り," 日本機械學會論文集, 第33卷, 第247號, pp. 343~350.
- (4) 송삼홍, 오환섭, 1985, "표면 결함에서 발생하는 피로크랙거동," 대한기계학회논문집, 제9권, 제2호, pp. 150~157.
- (5) 송삼홍, 오환섭, 1987, "미소원공 주위의 피로크랙발생 전과거동에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제1권, 제2호, pp. 250~258.
- (6) 송삼홍, 오환섭, 1987, "미소원공 주위의 피로크랙발생 전과거동에 관한 연구," 제1회 재료강도 Symposium 초록집, pp. 251~258.
- (7) Horii, H. and Nemat-Nasser, S. 1985, "Elastic Fields of Interacting Inhomogeneities," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 21, No. 7, pp. 731~745.
- (8) 八田正俊, 村上敬宜, 石田誠, 1985, "2個のた原形介在物の干涉における應力場," 日本機械學會論文集, 第51卷, 第464號, pp. 1057~1065.
- (9) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S. 1983, "Growth and Stability of Interacting Surface Flaws of Arbitrary Shape," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 17, No. 3, pp. 193~210.
- (10) 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.
- (11) Miyoshi, T., Shiratori, M. and Tanabe, O., 1985, "Stress Intensity Factors for Surface Cracks with Arbitrary Shapes in Plates and Shells," *Fracture Mechanics, 16th Symposium*, ASTM STP868, pp. 521~534.
- (12) Roger Chang, 1982, "On Crack-Crack Interaction and Coalescence in Fatigue," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, No. 5, pp. 683~693.
- (13) Neuber, H., 1957, *Theory of Notch Stresses*, Springer, Berlin
- (14) Peterson, R.E., 1962, *Stress Concentration Design Factors*, John-Wiley & Sons.
- (15) 西田, 1973, 應力集中, 森北出版.
- (16) 村上敬宜, 谷石顔文, 西谷弘信, 1983, "軸對稱形 表面ビットを有する半無限體の二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, pp. 150~159.
- (17) 野口博司, 西谷弘信, 後藤浩文, 1988, "ドリル穴狀 ビ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, pp. 977~982.
- (18) 송삼홍, 김진봉, 1991, "유한요소법에 의한 미소원공 주위의 응력분포에 대한 3차원 해석," 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1462~1471.
- (19) Song, S. H. and Kim, J. B., 1992, "Analysis of the Stress Distribution around Flaws and the Interaction Effects between Fatigue Cracks by F.E.M.," *VII International Congress on Experimental Mechanics and Manufacturers Exhibit*, pp. 200~204.
- (20) 村上敬宜, 清水眞佐男南, 1985, "疲勞強盜に及ぼす介在物, 微小缺陷, 微小き裂の影響," 日本機械學會論文集, 第154卷, 第499號, pp. 413~425.
- (21) 송삼홍, 윤명진, 1988, "프리크랙과 미소원공재의 크랙성장 하한계 조건에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp. 278~295.
- (22) Murakami, Y. and Nemat-Nasser, S., 1982, "Interaction Dissimilar Semi-Elliptical Surface

- Flaws Under Tension and Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 16, No. 3, pp. 373~386.
- (23) Heath, B. J. and Grandt Jr., 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.