

경계요소법을 이용한 관통균열의 응력확대계수에 미치는 미소결함의 영향에 관한 연구

성기득*, 양원호**, 조명래***
(1997년 8월 25일 접수)

A Study on the Effect of Micro Defect on Stress Intensity Factor of Through-Crack by Boundary Element Method

Ki-Deug Sung and Won-Ho Yang and Myoung-Rae Cho

Key Words : Boundary Element Method(경계요소법), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Micro Defect(미소결함)

Abstract

Many researchers have dealt with the problems of fracture mechanics. Generally, these researches are concerned with crack in isotropic material without other micro defects. Actual structure, however, may contain micro defects as well as crack in manufacture processing or operation. If it contains micro defects near a crack, some different characteristics will be appear in fracture behaviors of the crack. This study examines the effect of the micro defect on stress intensity factor of center slant crack in a rectangular plate subjected to uniform uniaxial tensile stress. In this study, boundary element method(BEM) is used for analysis in stress intensity factor(SIF).

기호설명

- | | |
|--|---------------------------|
| d : 균열과 미소결함 사이의 거리 | r : 미소결함의 반경 |
| E : 탄성계수 | α : 균열과 미소결함 사이의 각 |
| H : 판재의 길이 | ξ, x', y' : 국소좌표계 |
| W : 판재의 폭 | θ : 균열경사기울기 |
| K_I : 모드 I 응력확대계수 | ν : 프와송 비 |
| K_{II} : 모드 II 응력확대계수 | σ : 부가하중 |
| K_{I0} : 미소결함이 존재하지 않는 경우의 모드 I 응력확대계수 | |
| K_{II0} : 미소결함이 존재하지 않는 경우의 모드 II 응력확대계수 | |

1. 서론

구조물에서 균열의 존재는 구조물 본래의 사용 수명에 대하여 수명단축을 가져오는 큰 원인이 된다. 이러한 균열은 재료의 제조과정 중에 생길 수도 있으며 또한 사용중 가속한 환경조건에 의해서 발생하기도 한다. 구조물에 존재하는 균열의 발생과 성장 그리고 파괴에 이르는 문제를 정량적으로 해결하려는 파괴역학이 중요하게 대두

* 회원, 성균관대학교 대학원
** 회원, 성균관대학교 기계공학부
*** 회원, 인덕대학 기계설계과
E-mail : mrcho@induk-c.ac.kr
TEL : (02)901-7690 FAX : (02)901-5340

되고 있는 것도 이런 이유에 있다고 할 수 있다.

선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics : LEFM)에서는 응력확대계수(stress intensity factor : SIF)와 균열개구변위(crack opening displacement : COD) 그리고 에너지해방률(energy release rate : G) 등을 파괴평가기준으로 삼고 있는데, 이중에서도 균열선단에서의 소규모 항복조건을 전제로 하는 응력확대계수가 가장 널리 사용되고 있다. 그렇기 때문에 구조물 내의 균열에 대한 응력확대계수의 정확한 평가는 구조물의 안전설계설정이나 피로수명 또는 파괴방지를 위해서 절대적으로 중요하다고 할 수 있다.

현재까지 많은 연구자들이 응력확대계수 문제를 해석하기 위해서 노력해 왔으며, 일반적으로 이러한 연구는 등방성 재료 내의 균열에 대한 것이었다. 그러나 실제 구조물은 균열 외에도 자연 발생이나 인위적인 미소결합이 존재할 수 있으므로 미소결합이 존재하는 균열에 대한 응력확대계수의 정확한 평가가 필요하다. 미소결합은 크게 두 가지로 나눌 수가 있다. 첫째는 자유경계의 구멍이 뚫려져 있는 경우이고, 둘째는 모재보다 탄성계수가 큰 이물질이 편석되어 있는 경우이다. 본 연구에서는 이들을 모두 원형 미소결합으로 이상화하고 그 명칭을 첫번째 미소결합은 구멍(hole), 두번째 미소결합은 게재물(rigid inclusion)이라 정의하기로 한다. 이러한 미소결합들이 응력확대계수에 미치는 영향때문에 구조물의 파괴 거동은 지금까지와는 다른 양상을 가지게 되며, 이러한 문제를 해석하는 방법에 있어서는 실험에 앞서 수치해석에 의한 파괴거동을 예측하는 방법을 많이 채택하고 있다. 수치해석에는 많이 사용되고 있는 방법은 유한요소법과 경계요소법^(1,2) 그리고 유한차분법이 있다. 이 중에서 경계요소법은 수치해석에 의해서 파괴문제를 다룰 때, 정확한 결과를 가져다 줄뿐 아니라 경계 부분만을 가지고 모델링하기 때문에 복잡한 구조물을 적은 수의 절점과 요소로서 간단히 모델링할 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 이유 때문에 본 논문에서는 경계요소법 중 파괴문제를 효율적으로 해석할 수 있는 혼합 경계요소법⁽³⁾을 이용한 프로그램을 이용하고자 한다.

수치해석에 의해 연구된 균열과 미소결합에 관한 기존의 논문들은 균열선단 근처에 미소결합이 존재할 때만이 응력확대계수값을 가장 크게 변화

시킨다는 가정아래, 균열선단에 미소결합이 있는 경우에 대해서 그리고 균열의 형태도 파괴 모드 I의 경우에 대해서 연구가 되어 있다.

본 연구에서는 응력확대계수값을 변화시키는데 있어서는 하중과 미소결합의 위치에 대한 관계가 있는 것으로 보고 미소결합의 대표적인 두 종류(홀, 게재물)를 설정하여, 미소결합의 위치(균열주위)와 크기에 따른 혼합모드(mode I, mode II)의 응력확대계수를 해석함으로써 미소결합이 균열의 응력확대계수에 미치는 영향에 대해서 알아보고자 한다.

2. 경계요소해석

2.1 해석모델 및 해석방법

기존의 파괴역학 문제에 많이 사용되었던 경계요소법 중 다중영역방법(multi-region method)은 인위적인 경계(artificial boundary)를 만들어야 함으로서, 단일영역방법(single-region method)들보다 더 큰 컴퓨터의 기억용량이 필요할뿐만 아니라 모델링에 있어서 요소망 구성이 훨씬 복잡하다. 그래서 본 연구에서는 단일영역방법 중 하나로 모델링에 있어서 요소망 구성이 간단한 혼합경계요소법을 이용하였다. 이 프로그램은 본해석과 같이 변수들을 바꾸어가며 많은 반복해석을 하는데 적절한 프로그램이라 할 수 있다.

해석모델은 Fig. 1에서와 같이 길이 $2H=100\text{mm}$ 폭 $2W=50\text{mm}$ 인 사각판재 중앙에 균열길이 $2a=10\text{mm}$ 인 경사균열과 한 개의 구멍 또는 게재물의 미소결합이 존재하며, 재료 물성치는 $E=200\text{GPa}$, $\nu=0.3$ 으로 설정하였다.

그리고 경계요소 모델링은 요소망의 수렴성 조사를 통하여 Fig. 2에서와 같이 균열면을 제외한 경계면에는 연속요소를 사용하였고, 균열면에는 불연속요소를 사용하였으며, 사용된 총 요소의 수와 총 절점수는 각각 42개와 92개이다. 판재는 y 방향 일축 인장응력 $\sigma=100\text{MPa}$ 을 받고 있으며, 미소결합(구멍 또는 게재물)은 좌표 원점(균열의 중앙점)을 중심으로 떨어진 거리 $d=14.3\text{mm}$ ($2a/d=0.7$)인 원호상에서 그 위치(x'/y')와 그 크기(r/a)를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 균열경사각도 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 의 각 경우에 대하여, 미소결합의 위치 $x'/y'=-2.0, -1.5, -1.0, -0.5,$

Table 1 Stress Intensity Factors(SIFs) K_{I0} , K_{II0} due to crack angle θ

	0°	15°	30°	45°
$K_{I0}/\sigma\sqrt{\pi a}$	1.0252	0.9577	0.7730	0.5181
$K_{II0}/\sigma\sqrt{\pi a}$	0.0000	0.2510	0.4367	0.5072

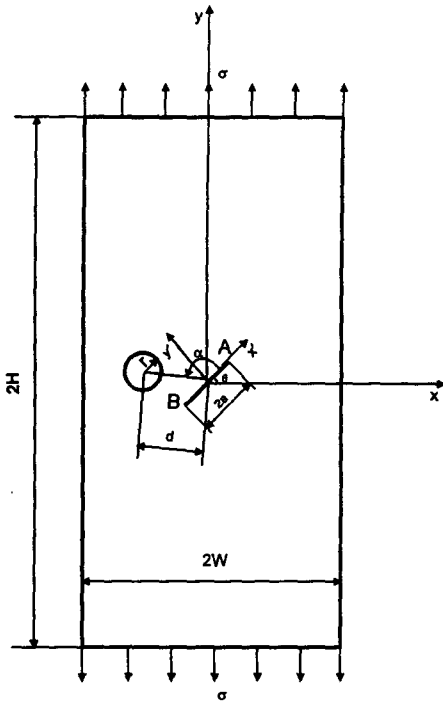


Fig. 1 The model of center slant crack and micro defect in a rectangular plate under uniform tension

0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 및 ∞ 로 변화시키고, 미소결합의 크기를 $r/a=0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 로 변화시켜가면서 균열선단 A 및 B에서의 응력확대계수 K_I 및 K_{II} 를 구하고 이 값들을 각각 미소결합이 없는 경우의 경사균열에 대한 응력확대계수 K_{I0} 및 K_{II0} 로 무차원화 하였으며 K_{I0} 와 K_{II0} 의 값은 균열경사각도에 따라서 Table 1과 같다.

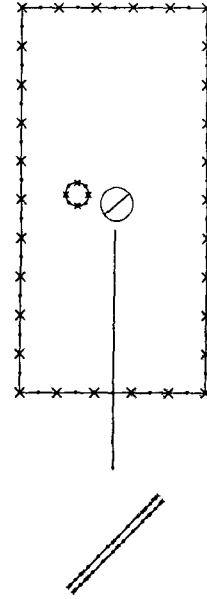


Fig. 2 Boundary Element Mesh for an analysis model

2.2 해석결과 및 고찰

2.2.1 미소결합이 구멍(hole)인 경우

응력확대계수에 미치는 미소결합 구멍의 영향에 대하여 균열경사각도 0°의 A점에서 해석한 결과를 Fig. 3에서 보면, 미소결합인 구멍이 균열의 중앙부근 상부 (또는 하부)에 있을 경우에는 값이 감소하며, 구멍이 균열의 양쪽 선단쪽으로 이동함에 따라 K_I 값이 증가해 가는 것을 알 수가 있다.

균열의 크기에 따른 각 곡선은 선들이 교차하는 부근에서 2개의 변곡점을 가지며 이 변곡점이 나타나는 위치는 $x'/y'=-0.4$ ($\alpha \approx 112^\circ$ 및 $x'/y'=0.8$; $\alpha \approx 51^\circ$)이다. 두 변곡점 사이(중앙부)에서는 구멍이 커짐에 따라 K 값의 감소가 크게 나타나며, 두 변곡점의 바깥부에서는 구멍이 커짐에 따라 K_I 값의 증가가 크게 나타나게 되어, 두 변곡점에서 각각 구멍의 크기에 따른 영향이 반전되는 특성을 나타냄을 알 수가 있다. K_I 값이 최소인 위치는 $x'/y'=x/y=0$ ($\alpha=90^\circ$) 근방으로서 균열의 중앙을 지나는 하중방향에 구멍이 있

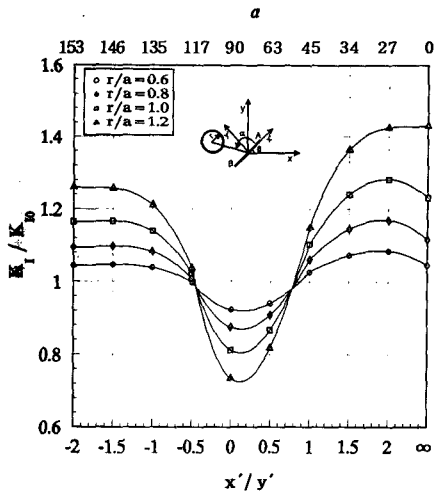


Fig. 3 The variation of stress intensity factor K_I due to one hole at the point A ($\theta=0^\circ$, $K_{I0}=1.0252\sigma\sqrt{\pi a}$)

는 경우이다.

이러한 현상은 구멍이 균열의 중앙 근처에 있는 경우에는 균열에 대하여 응력완화 효과를 일으켜 K_I 값의 감소를 가져오며, 구멍이 균열의 선단 근방에 있는 경우에는 자유경계 효과 때문에 K_I 값의 증가를 가져오는 것으로 생각된다. 두 변곡점에 대응하는 K_I/K_{I0} 값이 모두 대략 1인 것을 감안할 때 변곡점의 위치는 구멍의 응력완화 효과와 자유경계 효과가 상쇄되는 점인 것으로 추측된다. $\theta=0^\circ$ 일 때, 구멍이 B단 근처에 있을 경우보다 A단 근처에 있을 경우 A단의 응력확대계수에 미치는 영향이 더 클 것이므로 선도들이 $x'/y'=0$ 인 축에 대하여 비대칭(특히 구멍이 커질수록)인 것은 당연한 결과이다.

Fig. 4는 균열경사각도가 30° 인 경우이고, 경사진 균열의 경우에는 균열경사각도가 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 바뀔 때 따라 K_I 값이 감소하는 부분, 즉 응력을 완화시키는 구멍의 위치(x'/y')도 균열선단 쪽으로 약간씩 이동되는 것을 알 수 있었다. K_I 값이 가장 작은 위치 (x'/y')를 기준으로 할 때, 균열경사각도가 0° 에서 45° 로 바뀔 때 따라 그 위치도 $x'/y'=0.0$ 에서 $x'/y'=1.0$ 으로 변한다.

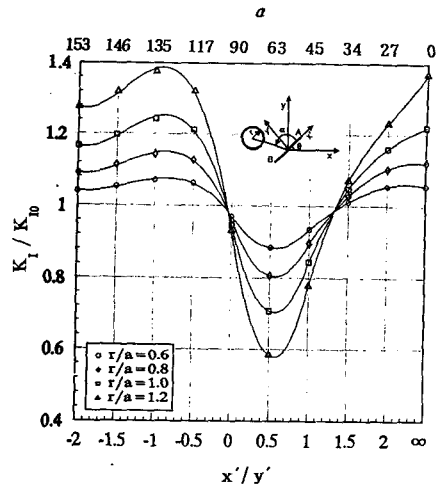


Fig. 4 The variation of stress intensity factor K_I due to one hole at the point A ($\theta=30^\circ$, $K_{I0}=0.7730\sigma\sqrt{\pi a}$)

경사진 균열의 경우에도 마찬가지로 이 위치 (x'/y')들은 미소결함이 x축과 이루는 각도를 기준으로 하면 90° 가 되며 이 각도는 하중방향과 일치하는 각도이다. 즉 구멍의 응력완화 효과에 의하여 K_I 값을 감소시키는 것은 하중방향과 관련이 있으며, K_I 값을 가장 작게 하는 위치는 구멍의 위치가 x축(수평축)을 기준으로 했을 때 하중방향과 일치하는 90° 근방이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 B점에서 각각 균열경사각도가 0° 일 때와 30° 일 때의 경우이다. 균열선단 B의 경우에도 A에서와 비슷한 경향으로 응력을 완화시키는 부분이 경사각이 커짐에 따라 점차적으로 하중방향 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있었다. B단에서는 K_I 를 가장 작게 하는 구멍의 위치는 모든 균열경사각도에서 x축을 기준으로 했을 때 105° 근방이다. 이것은 균열이 경사짐에 따라 반대편 하중의 영향을 많이 받기 때문이라고 생각된다.

응력확대계수 K_{II} 의 경우에도 구멍이 응력을 완화시키는 부분은 K_I 의 경우와 같이 하중방향과 관련이 있으며, 모든 균열경사각도에서 K_{II} 값을 가장 작게 하는 구멍의 위치는 x축을 기준으로 했을 때, A단의 K_{II} 값인 경우는 75° 근방이고 B단

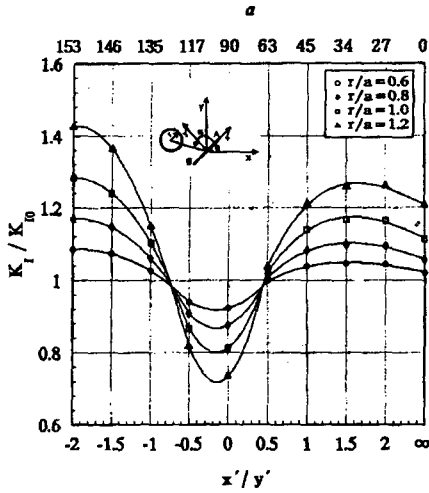


Fig. 5 The variation of stress intensity factor K_I due to one hole at the point B ($\theta=0^\circ$, $K_0=1.0252\sigma\sqrt{\pi a}$)

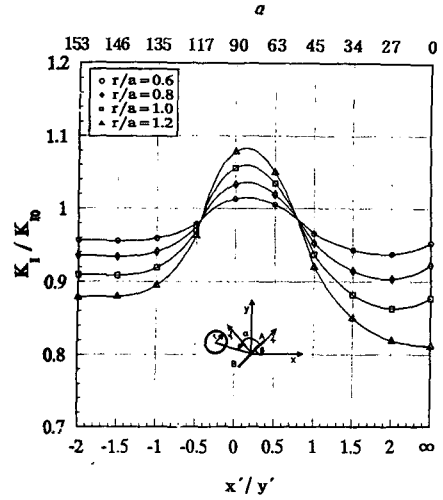


Fig. 7 The variation of stress intensity factor K_I due to one rigid inclusion at the point A ($\theta=0^\circ$, $K_0=1.0252\sigma\sqrt{\pi a}$)

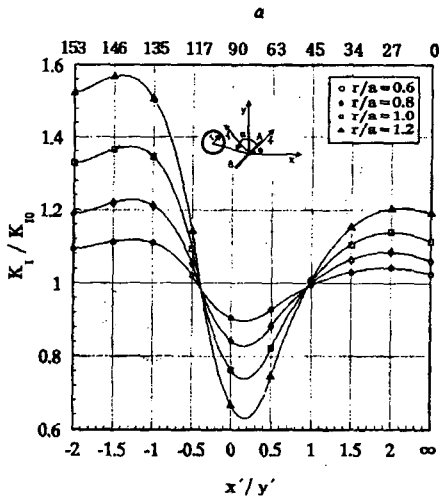


Fig. 6 The variation of stress intensity factor K_I due to one hole at the point B ($\theta=30^\circ$, $K_0=0.7730\sigma\sqrt{\pi a}$)

의 K_{II} 값인 경우는 90° 근방이었다.

그리고 결과의 모든 경우에 대해서 구멍의 크기에 대한 경향을 자세히 보면, 구멍의 크기가 커질수록 K 값이 증가하는 경향에서는 그 증가되

는 정도가 점점 커지고 K 값이 작아지는 경향에서는 그 작아지는 정도가 점점 커진다는 것을 알 수 있다.

위의 구멍에 의한 K 값의 감소효과는 피로균열의 성장 억제라는 관점에서 중요한 연구 과제가 되리라 생각한다.

2.2.2 미소결함이 게재물(rigid inclusion)인 경우
 응력확대계수에 미치는 미소결함 게재물의 영향은 균열경사각도 0° 의 A단에서 해석한 Fig. 7에서와 같이 구멍인 경우와 완전히 반대되는 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

즉 변곡점의 위치는 Fig. 3에서와 똑같으나 중앙부에서는 K_I 값이 증가하며 게재물이 커질수록 그 증가도가 크게 나타나는 반면에, 두 변곡점의 바깥부에서는 K_I 값이 감소하며 게재물이 커질수록 그 감소도가 더 크게 나타나고 있다. K_I 값이 최대가 되는 위치는 역시 $\alpha \approx 90^\circ$ 로서 대략 균열의 중앙을 지나는 하중방향임을 알 수가 있다.

이러한 특성은 게재물이 균열의 중앙부근 상부(또는 하부)에 있을 경우에는 균열에 대하여 응력 집중을 증가시키는 반면 균열 선단 근방에 있을 경우에는 강체경계(rigid boundary) 효과를 나타내

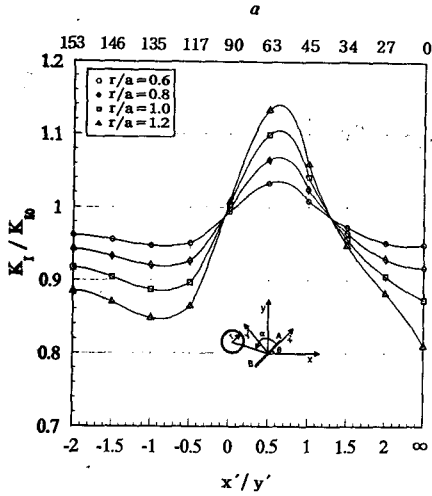


Fig. 8 The variation of stress intensity factor K_I due to one rigid inclusion at the point A ($\theta = 30^\circ, K_{I0} = 0.7730\sigma\sqrt{\pi a}$)

는 것으로 생각되며, 따라서 이때의 변곡점들은 응력집중 효과와 강체경계 효과가 상쇄되는 점이라 생각된다.

Fig. 8은 균열경사각도 30° 의 경우이고, 경사진 균열의 경우에도 응력집중을 일으키는 계재물의 위치가 x 축을 기준으로 했을 때 90° 근방으로 하중방향과 일치한다.

Fig. 9와 Fig. 10은 B점에서 각각 균열경사각도가 0° 일 때와 30° 일 때의 경우이다. 균열선단 B의 경우에도 구멍과 완전히 반대되는 경향으로 나타나며, 응력집중을 일으켜 K_I 값을 가장 크게 하는 계재물의 위치가 x 축을 기준으로 했을 때 105° 근방이었다. 그리고 응력확대계수 K_{II} 의 경우에는 K_{II} 값을 가장 크게 하는 계재물의 위치가 x 축을 기준으로 했을 때 A단의 경우는 75° 근방이고 B단의 경우는 90° 근방이었다.

계재물의 크기에 대한 영향도 구멍의 경우와 마찬가지로 미소결함의 크기가 커질수록 K 값이 증가하는 경향에서는 그 증가되는 정도가 점점 커지고 K 값이 작아지는 경향에서는 그 작아지는 정도가 점점 커진다는 것을 알 수 있다.

위에서 계재물이 균열의 중앙부 근방에 있을 경우 값이 급증하는 현상과 그것이 균열 선단 근방에 있을 경우 K 값이 급감하는 현상은 파괴역학

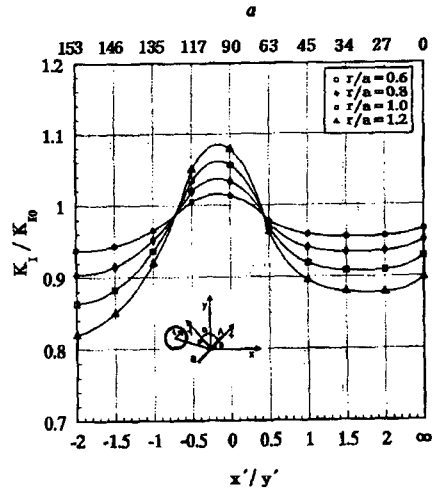


Fig. 9 The variation of stress intensity factor K_I due to one rigid inclusion at the point B ($\theta = 0^\circ, K_{I0} = 1.0252\sigma\sqrt{\pi a}$)

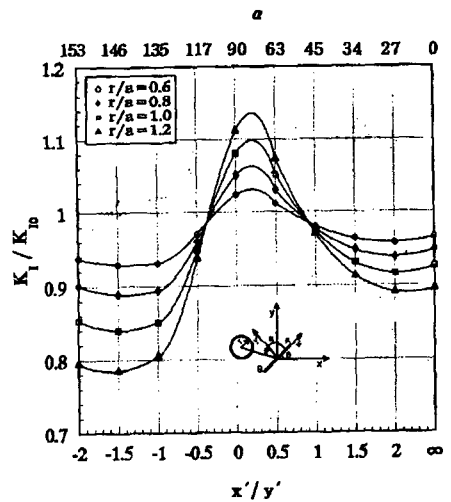


Fig. 10 The variation of stress intensity factor K_I due to one rigid inclusion at the point B ($\theta = 30^\circ, K_{I0} = 0.7730\sigma\sqrt{\pi a}$)

적으로 중요한 연구과제가 되리라 생각한다.

3. 결론

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 균열과

미소결합이 존재하는 유한 폭 사각형 판재에 일축 인장응력이 작용할 때, 응력확대계수 K_I, K_{II} 에 미치는 미소결합의 영향에 관한 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미소결합인 구멍이 하중방향에 대하여 경사된 균열의 응력확대계수에 미치는 영향은 다음과 같다. 구멍이 균열의 양단 근방에 있을 경우 응력확대계수를 증가시키는 효과를 나타내나, 구멍이 균열의 중앙 상부(또는 하부) 근방에 있을 경우 응력확대계수를 감소시키는 효과를 나타내며, 구멍이 균열의 중앙점을 지나는 하중방향(y 축방향)에 대하여 $\pm 15^\circ$ 내에 있을 경우 응력확대계수 값이 최소가 된다.

(2) 미소결합인 계재물이 하중방향에 대하여 경사된 균열의 응력확대계수에 미치는 영향은 구멍의 경우와 완전히 반대되는 경향으로 다음과 같다. 계재물이 균열의 양단 근방에 있을 경우 응력확대계수를 감소시키는 효과를 나타내나, 계재물이 균열의 중앙 상부(또는 하부) 근방에 있을 경우 응력확대계수를 증가시키는 효과를 나타내며, 계재물이 균열의 중앙점을 지나는 하중방향(y 축방향)에 대하여 $\pm 15^\circ$ 내에 있을 경우 응력확대계수 값이 최대가 된다.

(3) 미소결합의 크기가 응력확대계수에 미치는 영향은 미소결합의 크기가 커질수록 응력확대계수를 감소시키는 위치에서는 그 감소도를 더 크게 하며, 응력확대계수를 증가시키는 위치에서는 그 증가도를 더 크게 한다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Becker, A.A., 1992, *The Boundary Element Method in Engineering*, McGRAW-HILL, pp. 62~93.
- (2) Kane, J. H., 1994, *Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics*, Prentice-Hall, pp. 158~182.
- (3) Portela, A., Aliabadi, M. H. and Rooke, D. P., 1992, "The Dual Boundary Element Method : Effective Implementation for Crack Problems," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 33, pp. 1269~1287.
- (4) Martinez, J., Dominguez, J., 1984, "On the Use of Quarter-Point Boundary Elements for Stress Intensity Factor Computations," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 20, pp. 1941~1950.
- (5) Leita, V., Alibadi, M. H. and Rooke, D. P., 1995, "The Dual Boundary Element Formulation for Elastoplastic Fracture Mechanics," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 38, pp. 315~333.
- (6) Gray, L. J., Martha, L. F. and Intraffea, A. R., 1990, "Hypersingular Integrals in Boundary Element Fracture Analysis," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 29, pp. 1135~1158.
- (7) Murakami, Y., 1987, *STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK*, PERGAMON PRESS, pp. 279~282, pp. 909~911.
- (8) Lua, Y. J., 1993, "Elastic Interaction of a Fatigue Crack with a Micro-Defect by the Mixed Boundary Integral Equation Method," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 36, pp. 2743~2759.
- (9) Blandford, G. E., Ingraffea A. R. and J. A. Liggett, 1991, "Two-Dimensional Stress Intensity Factor Computations Using the Boundary Element Method," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 17, pp. 387~404.