

비균질재료의 3 차원 균열에 대한 응력확대계수 해석

김준수*, 이준성#

Stress Intensity Factor Analysis for Three-Dimensional Cracks in Inhomogeneous Materials

Jun-Soo Kim*, Joon-Seong Lee#

ABSTRACT

Accurate stress intensity factor analyses and crack growth rate of surface-cracked components in inhomogeneous materials are needed for reliable prediction of their fatigue life and fracture strengths. This paper describes an automated stress intensity factor analysis of three-dimensional (3D) cracks in inhomogeneous materials. 3D finite element method (FEM) was used to obtain the stress intensity factor for subsurface cracks and surface cracks existing in inhomogeneous materials. To examine accuracy and efficiency of the present system, the stress intensity factor for a semi-elliptical surface crack in a plate subjected to uniform tension is calculated, and compared with Raju-Newman's solutions. Then the system is applied to analyze cladding effect of subsurface cracks in inhomogeneous materials. The results were compared with those surface cracks in homogeneous materials. It is clearly demonstrated from these analyses that the stress intensity factors for subsurface cracks are less than those of surface cracks. Also, this system is applied to analyze cladding effect of surface cracks in inhomogeneous materials.

Key Words : Inhomogeneous Materials(비균질재료), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Finite Element Analysis(유한요소해석), Surface Crack(표면균열), Cladding(클래딩), Subsurface Crack(내부균열)

기호설명

a = a depth of a semi-elliptical surface crack
c = a half length of a semi-elliptical surface crack
K = the stress intensity factor for a Mode I crack

1. 서론

구조물에서 발견되어지는 균열은 표면균열 또

는 내부균열 등 3 차원 특성을 지니고 있다. 따라서 실구조물의 파괴역학 평가를 위해서는 3 차원 균열해석이 필수불가결의 요건이 되었다. 이를 위해 종래부터 유한요소법¹⁻³, 체적력법^{4,5}, 반복교대대입법^{6,7} 등 여러 가지 해석수법이 개발되어 왔다. 이러한 수법 가운데 효율성과 범용성의 관점에서 유한요소법이 가장 널리 이용되고 있는 실정이다. 그러나, 현실적으로 유한요소법을 이용하기 위해서는 몇 가지 어려운 점이 있다. 즉 3 차원 균열의

2002년 10월 17일 접수
* 경기대학교 기계공학과 대학원
교신저자, 경기대학교 기계시스템디자인공학부
Email jsleel@kyonggi.ac.kr Tel. (031) 249-9813

유한요소 해석에서는 대규모 해석이 되기 쉽고, 응력특이장인 균열선단 근방에 특수한 요소분할이 요구되어지기 때문에 요소생성을 포함한 입력데이터의 작성에 많은 노력이 필요하게 된다. 특히, 비균질재료에 존재하는 3 차원 균열인 경우에는 요소분할에 대한 어려움 때문에 이에 대한 자동화가 절실히 요구되고 있다. 실제 원자로 용기의 경우 페라이트(ferrite) 재료로 이루어진 모재가 운전환경에 의해 부식되는 것을 방지하기 위해 스테인리스 강과 같이 부식에 강한 재료로 내벽을 클래드(clad) 하게 된다⁸.

따라서, 본 연구에서는 비균질재료의 대표적인 예로서 금속에 다른 피복금속을 입힌 즉, 클래딩 처리한 비균질재료에 존재하는 균열에 대하여 응력확대계수 해석을 수행할 수 있는 시스템을 개발하였다. 우선, 시스템의 효율성을 검토하기 위하여 인장응력을 받고 있는 평판에 반타원 표면균열이 하나 존재하는 경우에 대한 FE 해석을 수행한 후, Raju-Newman 의 결과⁹ 와 비교하였다. 이 검증을 바탕으로 하여 개발된 시스템을 이용하여 비균질재료, 즉 재질로서 모재(Steel)와 클래딩 재료(Stainless steel)에 표면균열과 내부균열이 하나 존재하는 경우와 두개 존재하는 경우에 대한 응력확대계수 해석을 각각 수행하였다. 또한, 클래딩 재료의 두께 변화가 응력확대계수에 미치는 영향을 해석하였으며, 두개의 표면균열에 대해서는 클래딩 두께가 두 균열간의 상호간섭효과에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해석 시스템

표면균열이 존재하는 3 차원 유한요소망을 구성하려면 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 본 연구에서는 3 차원 균열에 대하여 FE 해석을 위한 자동요소분할 시스템을 개발하였다. 본 모듈은 균열의 형상, 재료물성치, 경계조건, 절점 및 요소의 구성에 필요한 사용자 입력부와 범용 해석코드인 ANSYS¹⁰ 를 이용한 해석부, 그리고 응력확대계수 값을 구해 나타내 주는 출력부로 구성되어 있다.

Fig. 1 은 시스템의 전체적인 구성을 나타낸 것이다. 입력부의 하나의 예로서 Fig. 2(a) 와 같이 평판에 하나의 표면균열이 균질재료에 존재하는 경우(surface crack)와 비균질재료에 존재하는 경우(subsurface crack and surface crack)에 대하여 각각

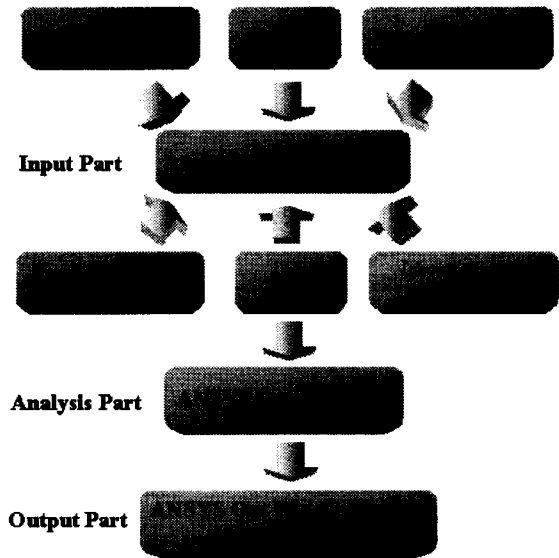
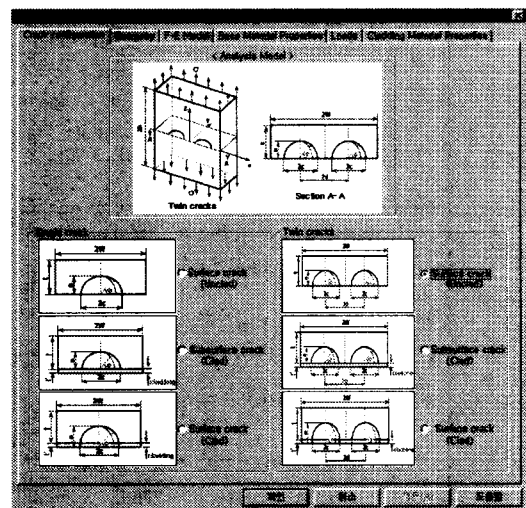
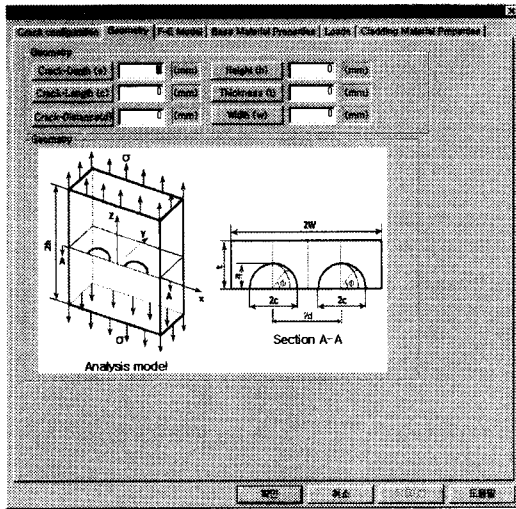


Fig. 1 The flowchart of S.I.F analysis system

선택할 수 있으며, 동일 형상의 두개의 표면균열에 대해서도 균질재료와 비균질재료에 대하여 각각 선택할 수 있도록 구성하였다. 또한, Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 선택한 균열형상에 따른 균열의 깊이, 표면길이, 두께 등의 파라미터를 입력할 수 있다. 해석에 필요한 하중과 재료물성치 등을 입력한 후에는 해석코드를 실행시켜 균열선단에 따른 임의의 점($2\theta/\pi$)에서 응력확대계수(S.I.F.) K 값



(a)



(b)

Fig. 2 Input screen of crack configuration and geometry

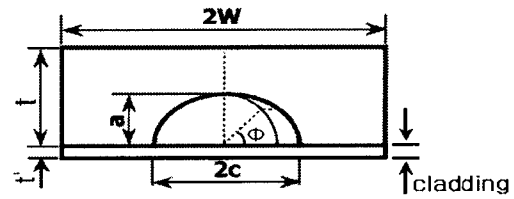
이 얻어지도록 구성하였다. 이 때 응력확대계수는 유한요소해석의 결과로부터 얻어지는 변위성분을 이용하는 변위외삽법³을 사용하였다.

반타원 균열의 최심점에서는 평면변형을 조건을, 표면점에서는 평면응력조건을 적용하여 계산되어진다.

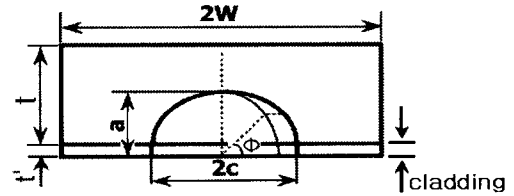
3. 유한요소해석

3.1 해석 모델

개발된 모듈을 이용하여 비균질재료(평판)에 존재하는 표면균열과 내부균열에 대한 응력확대계수의 해석을 수행하였다. Fig. 3 은 비균질재료에 존재하는 하나의 내부균열(a)과 표면균열(b)의 형상을 나타낸 것이며, Fig. 4 는 비균질재료에 존재하는 두개의 내부균열(a)과 표면균열(b)의 형상을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 5 와 Fig. 6 은 개발된 시스템을 이용하여 비균질재료의 평판에 존재하는 표면균열에 대하여 각각 유한요소 모델링한 결과를 나타낸 것이다. 대칭면을 이용하여 전체의 1/4 만 모델링하였으며, 균열선단에서는 거미줄 모양의 5 면체요소로, 그 이외 부분은 6 면체요소로 분할되어진다. 특히 균열선단에서는 응력의 특이성을 고려하여 특이요소(singularity element)¹¹로 분할되어 지도록 구성하였다.

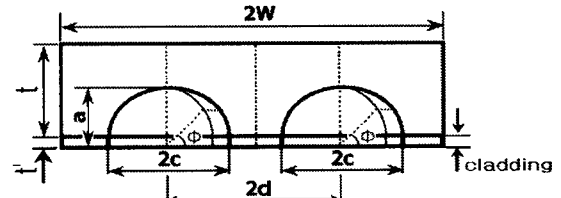


(a)

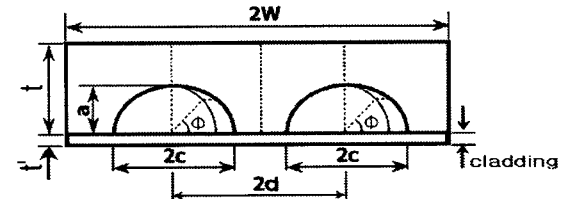


(b)

Fig. 3 Single subsurface crack of inhomogeneous plate



(a)



(b)

Fig. 4 Twin subsurface cracks of inhomogeneous plate

3.2 유한요소해석 모델의 검증

비균질재료의 유한요소해석 모델의 타당성을 검토하기 위하여 균질재료의 평판에 존재하는 하나의 반타원 표면균열에 대한 해석을 수행하였다. 균열의 형상비 $a/c=0.2, 0.4, 0.6$ 과 균열깊이비 $a/t=0.2, 0.4$ 에 대하여 여러 가지 해석을 수행하였으며, 각각의 형상에 대한 응력확대계수를 비교한 결과 Raju-Newman의 해⁵와 5%이내로 잘 일치하였다.

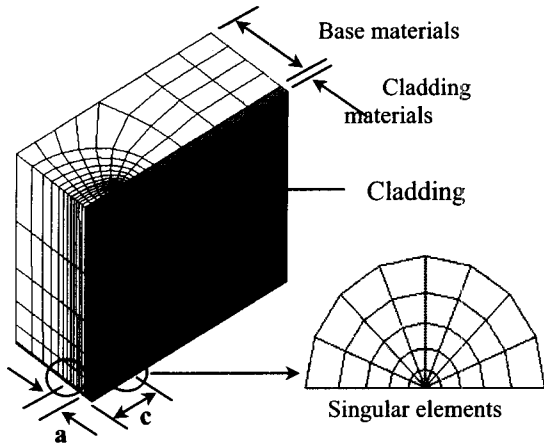


Fig. 5 Finite element mesh for single crack of inhomogeneous materials

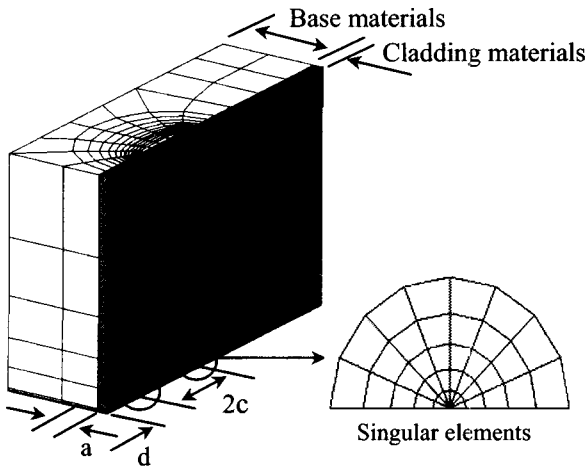


Fig. 6 Finite element mesh for twin cracks of inhomogeneous materials

하나의 예로서 균열의 형상비에 따른 최심점에서의 응력확대계수를 Raju-Newman 의 해와 비교하여 Fig. 7 에 도시하였으며, 3% 이내로 잘 일치한 이 결과 값들을 Table 1 에 나타내었다.

3.3 해석 결과

비균질재료에서의 클래딩 두께(t')가 응력확대 계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 하나의 표면균열과 두개의 표면균열에 대하여 각각 클래딩 두께를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 해석

에 사용된 비균질재료에 대한 물성치를 Table 2 에 나타내었으며, 내부균열과 표면균열에 대한 해석 결과를 균질재료의 표면균열에 대한 해석결과와 함께 비교하여 나타내었다.

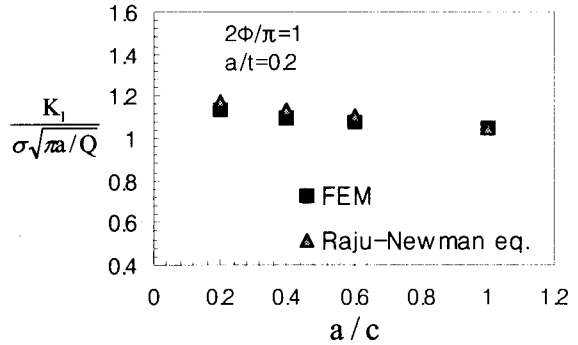


Fig. 7 Comparison of stress intensity factors from FEM and Raju-Newman solutions

Table 1 Difference present S.I.F from Raju-Newman solutions at the deepest point ($a/t=0.2$)

a/c	$F = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}/Q} (2\phi/\pi = 1)$		Difference [%]
	Present Sol.	Raju-Neman Sol.	
0.2	1.133	1.173	3.41
0.4	1.100	1.138	3.33
0.6	1.077	1.110	2.97
1.0	1.050	1.049	0.95

Table 2 Material properties

Base materials [Steel]		Cladding materials [Stainless steel]	
Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio ν	Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio ν
170	0.3	190	0.3

Fig. 8 은 Fig. 3(a)와 같은 하나의 내부균열에 대하여 $a/c=0.2$, $a/t=0.2$ 일때 클래딩 두께를 증가시키면서 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 클래딩 재료로 인해 응력확대계수는 클래딩 하지 않은 균질재료의 경우보다 현저히 작

아지는 것을 알 수 있다. 또한, 클래딩 두께가 두꺼워질수록 균열선단을 따른 모든 점에서 일정하게 감소되는 경향을 보였다. 이는 두께가 두꺼워질수록 클래딩 재료의 구속효과가 증가하기 때문이라 생각된다.

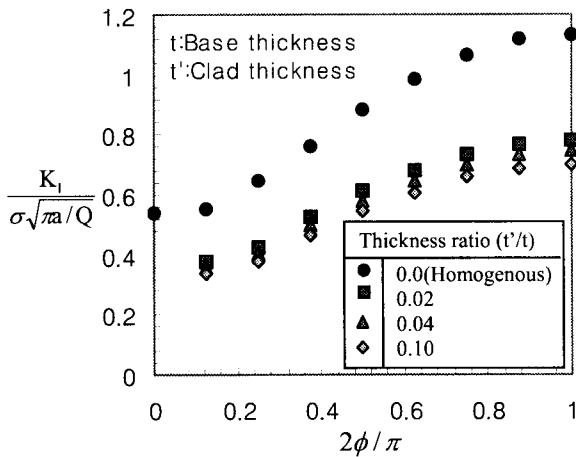


Fig. 8 Stress intensity factor for subsurface crack in inhomogeneous plate ($a/c=0.2$, $a/t=0.2$)

균열의 최심점($2\phi/\pi=1$)에서 균질재료의 표면균열과 동일 조건하의 비균질재료의 내부균열에 대한 응력확대계수의 차이를 Table 3에 나타내었다. 표면균열에 비하여 내부균열에 대한 응력확대계수 값이 작아지며, 균열의 형상비 $a/c=0.2$ 에서 클래딩 구속효과로 인해 최고 30% 감소하였다.

Fig. 9는 Fig. 4(a)와 같은 두 개의 내부균열에 대한 클래딩 재료의 구속효과를 알아 본 것으로서 $a/c=0.2$, $a/t=0.2$ 이며, 두 균열사이의 거리비(c/d)는 0.5이다. 하나의 내부균열과 마찬가지로 클래딩 재료의 구속효과로 인해 응력확대계수는 작아졌으며 클래딩 두께가 증가할수록 응력확대계수는 감소하였다.

Table 4는 균열 최심점에서의 응력확대계수 값을 균질재료와 비교하여 나타낸 것으로 균열의 형상비 $a/c=0.2$ 에서 가장 큰 감소량을 보였다.

앞의 Fig. 3(b)와 같이 비균질재료에 존재하는 표면균열, 즉 모재와 클래딩 재료 모두에 걸쳐 균열이 존재하는 경우에 대하여도 해석을 수행하였다.

Table 3 The difference between uncladding and cladding for single subsurface crack ($a/t=0.2$, $t'/t=0.02$)

a/c	$F = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}/Q} (2\phi/\pi = 1)$		Difference[%]
	Uncladding	Cladding	
0.2	1.13344	0.78295	30.92 Reduction
0.4	1.10052	0.81850	25.62 Reduction
0.6	1.07759	0.85394	20.75 Reduction

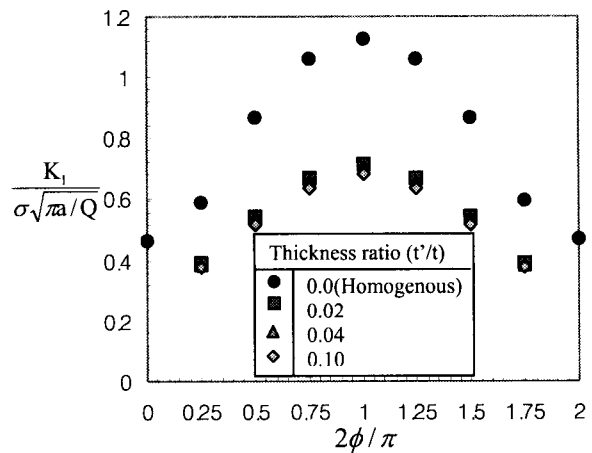


Fig. 9 S.I.F for twin subsurface crack in inhomogeneous materials and effect of cladding thickness ($a/c=0.2$, $a/t=0.2$, $c/d=0.5$)

Table 4 The difference between uncladding and cladding for twin subsurface crack ($a/t=0.2$, $t'/t=0.02$)

a/c	$F = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}/Q} (2\phi/\pi = 1)$		Difference[%]
	Uncladding	Cladding	
0.2	1.13344	0.77785	31.37 Reduction
0.4	1.10049	0.81390	26.04 Reduction
0.6	1.07635	0.88069	18.17 Reduction

클래딩재와 모재의 두께비(t'/t)에 따른 균열 표면점($2\phi/\pi=0$)에서의 응력확대계수 값을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 클래딩 두께가 증가할수록 응력확대계수 값이 커지는 경향을 보였다. 그러나 표면균열에 대한 표면점에서의 응력확대계수 값은 균질재료의 경우보다 더 크게

나타났으며, 이 결과로 인해 비균질재료에 표면균열이 존재 할 경우 표면점에서의 응력확대계수 값은 재료파괴에 있어서 최심점에서의 값 만큼 충분히 고려되어야 할 사항으로 간주된다.

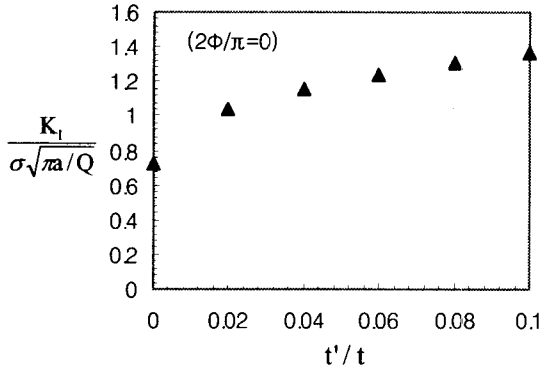


Fig. 10 Stress intensity factor at the surface point for single surface crack in inhomogeneous plate

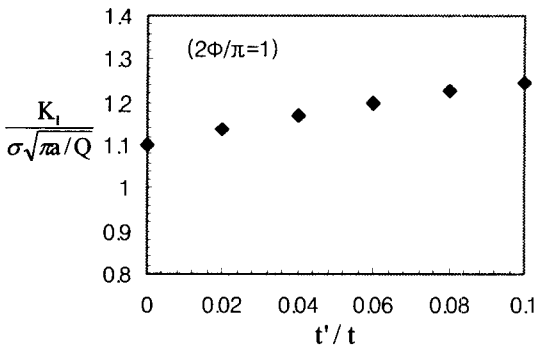


Fig. 11 Stress intensity factor at the deepest point for single surface crack in inhomogeneous plate

Fig. 11 은 비균질재료에 존재하는 표면균열에 대하여 클래딩 두께(t')를 증가시키면서 최심점에서의 응력확대계수를 나타낸 것이다. 클래딩 두께에 비례하여 균열 최심점에서의 응력확대계수 값 또한 커지는 것을 알 수 있다. 이 해석결과는 균질재료의 표면균열에서 고정된 균열길이 c 에 대하여 균열길이 a 가 증가할수록 최심점에서의 응력확대계수 값이 작아지는 결과와 반비례하였다.

Fig. 12 는 Fig. 4(b)와 같이 비균질재료에 존재하는 두개의 표면균열에 대한 상호간섭효과를 알아보기 위하여 해석한 경우이다. 표면점($2\Phi/\pi = 2$)

에서의 응력확대계수 값은 두 균열사이의 거리(d)가 작을수록 상호간섭효과로 인하여 커지는 것을 알 수 있었다. 또한, 클래딩 두께가 증가할수록 응력확대계수 값은 증가하며, 두 균열사이의 거리비(c/d)가 1.0 일 때는 즉, 두 균열이 서로 접촉한 경우에는 클래딩 두께에 따른 응력확대계수 증가 값이 0.5 와 0.25 에 비해 상당히 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

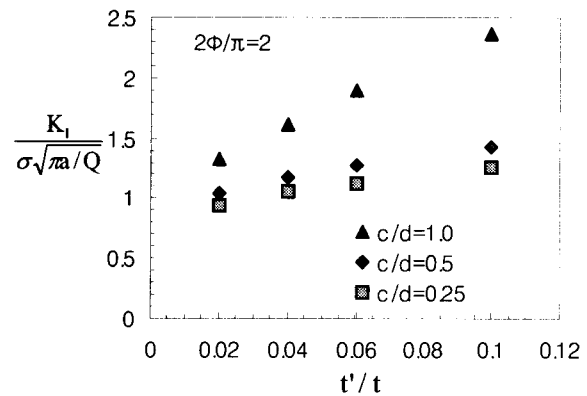


Fig. 12 S.I.F at the surface point($2\Phi/\pi = 2$) for twin surface cracks in inhomogeneous plate

4. 결론

본 연구에서는 비균질재료의 평판에 존재하는 3 차원 균열에 대한 응력확대계수 해석을 위하여, 해석코드와 연계된 자동 요소분할 모듈을 개발하였다. 개발된 시스템을 이용하여 인장력을 받는 비균질 평판내의 표면균열 및 내부균열에 대한 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일 조건하에서 균질재료에 존재하는 표면균열과 비균질재료에 존재하는 내부 결함에 대한 각각의 응력확대계수 값을 비교하여 본 결과, 비균질재료의 내부결함에 대한 응력확대계수가 클래딩 재료의 구속효과에 의해서 상당히 감소하였다. 이는 하나와 두개의 내부균열 모두에서 같은 경향을 보였다.
2. 비균질 재료의 내부균열에 대한 응력확대계수는 균질재료의 표면균열과 비교하여 균열의 형상비(a/c)가 작을수록 더 큰 구속효과를 보였다.

3. 비균질재료에 하나의 표면균열이 존재하는 경우, 균열 표면점($2\phi/\pi=0$)에서의 응력확대계수 값은 클래딩 두께(t')가 증가할수록 커지며 이 값은 균질재료의 표면균열에 대한 값보다 상당히 커지는 것을 알 수 있었다. 또한, 이때의 최심점($2\phi/\pi=1$)의 응력확대계수 값 또한 클래딩 두께에 비례하여 증가하였다.
4. 비균질재료에 두개의 표면균열이 존재할 때, 두 표면 균열의 상호 간섭효과로 인해 두 균열 사이가 가까울수록 표면점($2\phi/\pi=2$)에서의 응력확대계수 값은 증가하였다. 또한, 클래딩 두께가 증가할수록 응력확대계수 값은 커지며, 두 균열이 접촉한 경우에는 클래딩 두께가 표면점($2\phi/\pi=2$)에서의 응력확대계수 값에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

- Alternating Method," International Journal of Fracture, Vol. 12, pp. 45-57, 1976.
8. Kim, J. S., et. al., "Effect of Cladding on Stress Intensity Factors in Reactor Pressure Vessel," Trans. KSME, Vol. 22, No. 10, pp. 1938-1946, 1998.
9. Newman, J. C and Raju, I. S., "A Review and Assessment of the Stress Intensity Factors for Surface Crack," ASTM STP 687, pp. 16-42, 1979.
10. Moaveni, S., "Finite Element Analysis : Theory and Application with ANSYS," Pearson Education Korea 2001.
11. Barsoum, R. S., "Application of Quadratic Iso-parametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics," International Journal of Fracture, Vol. 10, pp. 603-605, 1974.

참고문헌

1. Raju, I. S. and Newman, J. C., "Stress Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite Thickness Plates," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 817-829, 1979.
2. Chow, C. L. and Lau, K. J., "On the Finite Element Method for Calculation Stress Intensity Factors with a Modified Elliptical Model," International Journal of Fracture, Vol. 12, pp. 59-69, 1976.
3. Tracey, D. M., "Finite Elements for Three-Dimensional Elastic Crack Analysis," Nuclear Engineering and Design, Vol. 26, pp. 282-290, 1974.
4. Isida, M., Yoshida, T. and Noguchi, H., "Tension of Finite-Thickness Plate with a Pair of Semi-Elliptical Surface Cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, pp. 961-965, 1990.
5. Isida, M., Noguchi, H. and Yoshida, T., "Tension and Bending of Finite-Thickness Plate with a Semi Elliptical Surface Crack," International Journal of Fracture, Vol. 26, pp. 157-188, 1984.
6. Shah, R. C. and Kobayashi, A. S., "Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack Under Arbitrary Normal Loading," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 3, pp. 71-96, 1971.
7. Smith, F. W. and Sorensen, D. R., "The Semi-Elliptical Surface Crack : A Solution by the