

비균질재료의 표면균열에 대한 응력확대계수 해석

김준수*(경기대 대학원 기계공학과), 이준성(경기대 기계공학과)

Stress Intensity Factor Analysis for Surface Crack in Inhomogeneous Materials

J. S. Kim(Graduate School, Kyonggi Univ.), J. S. Lee(Dept. of Mechanical Eng. Kyonggi Univ.)

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 system for analyzing the stress intensity factors 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.

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

1. 서론

구조물에서 발견되어지는 균열은 표면균열 또는 내재균열 등 3 차원 특성을 지니고 있다. 따라서 실 구조물의 파괴역학 평가를 위해서는 3 차원 균열해석이 필수불가결의 요건이 되었다. 이를 위해 종래부터 유한요소법⁽¹⁾, 체적력법⁽²⁾, 반복교대대입법⁽³⁾ 등 여러가지 해석수법이 개발되어 왔다. 이러한 수법 가운데 효율성과 범용성의 관점에서 유한요소법이 가장 널리 이용되고 있는 실정이다. 그러나, 현실적으로 유한요소법을 이용하기 위해서는 몇가지 어려운 점이 있다. 즉 3 차원 균열의 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 된다⁽⁴⁾.

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-Newman의 결과⁽⁵⁾와 비교하였다. 이 검증을 바탕으로 하여 개발된 시스템을 이용하여 비균질재료, 즉 재질로서 모재(Steel)와 클래딩 재료(Stainless steel)에 표면균열과 내부균열이 존재하는 경우에 대한 응력확대계수 해석을 수행하였다. 또한, 클래딩 재료의 두께 변화가 응력확대계수에 미치는 영향을 해석하였다.

2. 해석 시스템

표면균열이 존재하는 3 차원 유한요소망을 구성

하려면 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 본 연구에서는 3 차원 균열에 대하여 FE 해석을 위한 자동 요소분할 시스템을 개발하였다. 본 모듈은 균열의 형상, 재료물성치, 경계조건, 절점 및 요소의 구성에 필요한 사용자 입력부와 범용 해석코드인 ANSYS⁽⁶⁾를 이용한 해석부, 그리고 응력확대계수를 구해 나타내 주는 출력부로 구성되어 있다. Fig. 1 은 사용자 입력부의 전체적인 구성을 나타낸 것이다. 하나의 예로서 Fig. 2(a) 와 같이 표면균열이 균질재료에 존재하는 경우(surface crack)와 비균질재료에 존재하는 경우(subsurface crack and surface crack)에 대하여 각각 선택할 수 있도록 하였다. 또한, Fig. 2(b)에 나타낸 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($2\phi/\pi$)에서 응력확대계수(S.I.F.) K 값이 얻어지도록 구성하였다. 이 때 응력확대계수는 유한요소해석의 결과로부터 얻어지는 변위성분을 이용하는 변위외삽법을 사용하였다. 반타원 균열의 최심점에서는 평면변형률 조건을, 표면점에서는 평면응력조건을 적용하여 계산되어 진다.

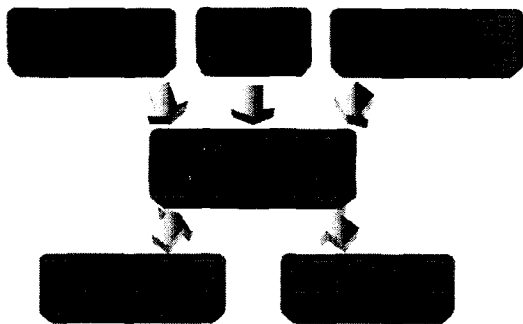
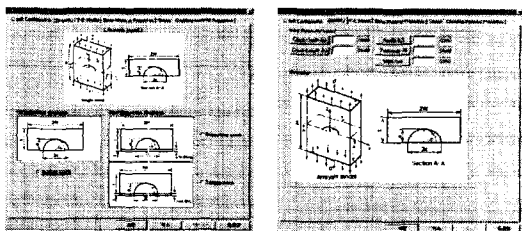


Fig. 1 Structure of the input part



(a) (b)

Fig. 2 Input screen of crack configuration and geometry

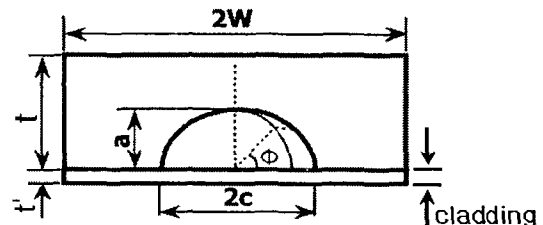
3. 유한요소해석

3.1 해석 모델

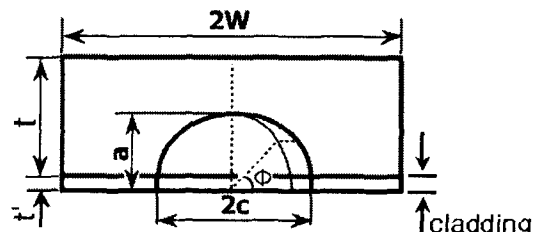
개발된 모듈을 이용하여 비균질 재료(평판)에 존재하는 표면균열과 내부균열에 대한 응력확대계수의 해석을 수행하였다. Fig. 3 은 비균질 재료에 존재하는 하나의 내부균열(a)과 표면균열(b)의 형상을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 4 는 비균질재료의 평판에 존재하는 표면균열에 대한 유한요소 모델링한 결과를 나타낸 것이다. 대칭면을 이용하여 전체의 1/4 만 모델링 하였으며, 균열선단에서는 거미줄 모양의 5면체요소로, 그의 부분은 6면체 요소로 모델링하였다. 특히 균열선단에서는 응력의 특이성을 고려하여 특이요소(singularity element)로 모델링하였다.

3.2 유한요소해석 모델의 검증

비균질재료의 유한요소해석 모델의 타당성을 검토하기 위하여 균질재료의 평판에 존재하는 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-Newman 의 해⁽⁵⁾와 5%이내로 잘 일치하였다. 하나의 예로서 균열의 형상비에 따른 최심점에서의 응력확대계수를 Raju-Newman 의 해와 비교하여 Fig. 5 에 나타내었다. 이 결과 값들 또한 1~3% 이내로 잘 일치함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Subsurface crack and surface crack of inhomogeneous plate

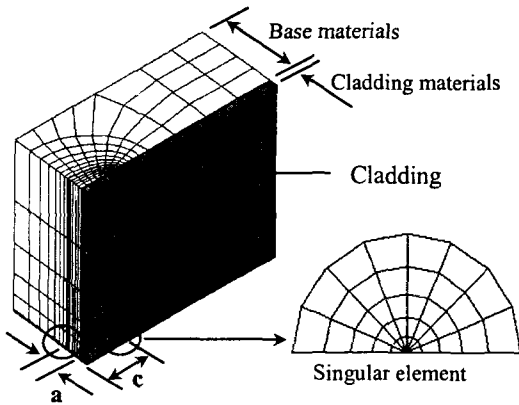


Fig. 4 A typical mesh of a quarter portion of an inhomogeneous plate with a surface crack

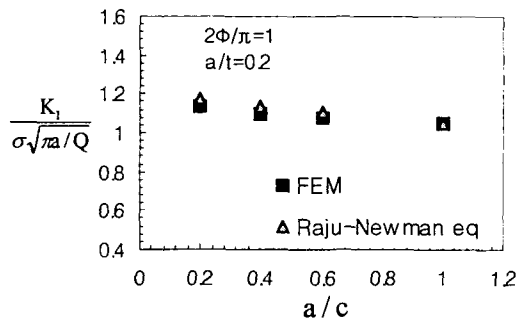


Fig. 5 Comparison of present stress intensity factor with Raju-Newman solutions

3.3 해석 결과

비균질재료에서의 클래딩 두께(t')가 응력확대 계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 클래딩 두께를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 비균질재료에 대한 물성치를 Table 1에 나타내었으며, 내부균열과 표면균열에 대한 해석결과를 균질재료의 표면균열에 대한 해석결과와 함께 나타내었다.

Table 1 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. 6 과 Fig. 7 은 Fig. 3(a)와 같은 하나의 내부 균열에 대하여 각각 $a/c=0.2$, $a/c=0.4$ 이고, $a/t=0.2$ 일

때 클래딩 두께를 증가시키면서 해석한 결과를 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 클래딩 재료로 인해 응력확대계수는 클래딩 하지 않은 균질 재료의 경우보다 현저히 작아지는 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.

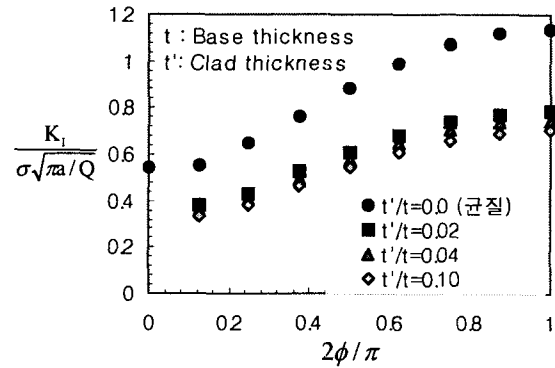


Fig. 6 Stress intensity factor for subsurface crack in inhomogeneous plate ($a/c=0.2$, $a/t=0.2$)

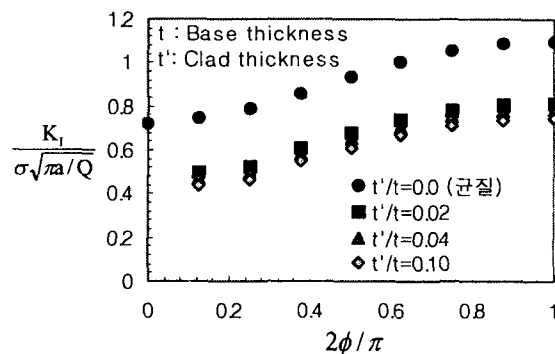


Fig. 7 Stress intensity factor for subsurface crack in inhomogeneous plate ($a/c=0.4$, $a/t=0.2$)

Table 2 The difference between uncladding and cladding ($a/t=0.2$, $t'/t=0.02$)

a/c	$F = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}/Q} (2\phi/\pi = 1)$		Difference[%]
	Uncladding	Cladding	
0.2	1.13344	0.78333	30.92 감소
0.4	1.10052	0.81884	25.62 감소
0.6	1.07759	0.85428	20.75 감소

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

앞의 Fig. 3(b)와 같이 비균질재료에 존재하는 표면균열, 즉 모재와 클래딩 재료 모두에 걸쳐 균열이 존재하는 경우에 대하여도 해석을 수행하였다. 클래딩재와 모재의 두께비(t'/t)에 따른 균열 표면점($2\phi/\pi=0$)에서의 응력확대계수 값을 Fig. 8에 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 존재할 경우 표면점에서의 응력확대계수 값은 재료과피에 있어서 최심점에서의 값 만큼 충분히 고려되어야 할 사항으로 간주된다.

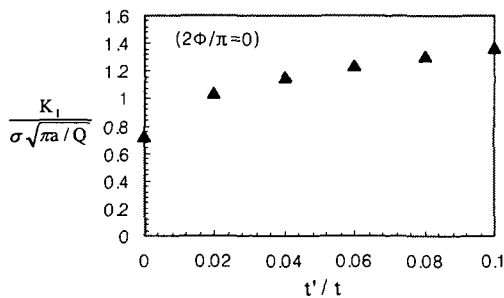


Fig. 8 Stress intensity factor at the surface point for single surface crack in inhomogeneous plate

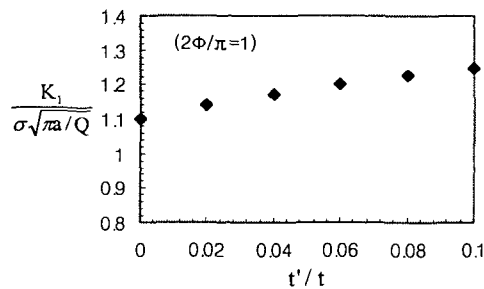


Fig. 9 Stress intensity factor at the deepest point for single surface crack in inhomogeneous plate

Fig. 9는 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 균질재료

의 표면균열에서 고정된 균열길이 c 에 대하여 균열깊이 a 가 증가할수록 최심점에서의 응력확대계수 값이 작아지는 결과와 반비례하였다.

4. 결론

본 연구에서는 비균질재료의 평판에 존재하는 3차원 균열에 대한 응력확대계수 해석을 위하여, 해석코드와 연계된 자동 요소분할 모드를 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.
2. 비균질 재료의 내부균열에 대한 응력확대계수는 균질재료의 표면균열과 비교하여 균열의 형상비(a/c)가 작을수록 더 큰 구속효과를 보였다.
3. 비균질재료에 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 파악하였으며, 이때의 최심점($2\phi/\pi=1$)의 응력확대계수 값 또한 클래딩 두께에 비례하여 증가하였다.

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", Eng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 817-829, 1979.
- [2] Isida, M., Yoshida, T. and Noguchi, H., "Tension of Finite-Thickness Plate with a Pair of Semi-Elliptical Surface Cracks, Eng. Fract. Mech., Vol. 35, pp. 961, 1990.
- [3] Shah, R.C. and Kobayashi, A.S., "Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack Under Arbitrary Normal Loading, Eng. Fract. Mech., Vol. 3, PP. 71-96, 1971.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Moaveni, S., "Finite Element Analysis : Theory and Application with ANSYS", Pearson Education Korea. 2001