

피로 하중하에서의 복수표면크랙진전에 관한 수치시물레이션

Numerical Simulation of Fatigue Growth of Multiple Surface Crack under Fatigue Load

한 문 식*
Moon Sik Han

ABSTRACT

This paper describes a versatile finite element technique which has been used to investigate wide range of structural defects of practical importance. The procedure automatically remeshes the three-dimensional finite element model during the stages of crack growth. Problems include the surface cracks in leak-before-break situations, the shape development of multiple surface defects.

주요기술용어 : Finite element method(유한요소법), Linear elastic fracture mechanics(선형파괴역학), Multiple crack growth(복수크랙진전), Fatigue(피로), Opening mode stress intensity factor(모드 I 응력확대계수), Shape development(형상성장)

1. 서 론

실제하중을 받는 기기 및 압력용기 구조물에 발생하는 이른바 자연크랙은 특수한 경우를 제외하고는 표면크랙 또는 평면크랙이나 3차원 파괴특성을 지닌 크랙형태로 나타나는 것이 보통이며, 안전설계 및 안전성 검토시 이러한 크랙에 대한 거동파악이 국내 뿐만아니라, 여러 선진국에서 필수적으로 수행되어지고 있다.^{1,2)}

또한 최근에는 경량화를 위하여 고장력강을 사용하는 차량을 포함하는 수송 기계 및 LPG, LNG 등 고압, 저온 연료 저장탱크의 압력용기 구조물에서 보다 정확한 안전설계 및 안전성 평가를 위하여 구조분야에서 각광을 받고 있는 유

한요소법과 거의 정립단계에 있는 선형파괴역학을 이용하여 이러한 크랙에 대한 특성을 수치기법을 통한 평가 검토가 제공되어지고 있다.³⁻¹³⁾

크랙이 존재하는 기기 및 구조물의 피로수명과 크랙크기의 변화는 파괴강도인 응력확대계수에 크게 영향을 미치기 때문에 보다 정확한 피로수명예측 및 크랙크기 변화를 구하기 위해서는 응력확대계수의 정확한 추정이 요구된다. 실제 구조물에 존재하는 여러 가지 복잡한 크랙형태에 대한 응력확대계수 추정을 위하여 여러 가지 수치방법들이 사용되어지고 있다. 복잡한 형태인 다양한 크랙에 대하여 응력확대계수의 해가 체적력, 경계요소, 유한요소 및 기타 다양한 변화기법을 통하여 정리되어지고 있으나 많은 경우 이러한 방법들에 의해서 응력확대계수에

* 회원, 계명대학교 기계·자동차공학부

대한 오차가 발생되므로 보다 합리적인 파괴강도 및 피로수명 추정이 단계별 크랙성장의 특성에 따라 요구되어 진다.

Parks³⁾와 Hellen⁴⁾은 Virtual crack extension 기법으로 응력확대계수를 계산하였고, Henshell과 Shaw,⁵⁾ Barsoum⁶⁾은 크랙진 물체에서 $1/\sqrt{r}$ 의 특이성을 더 정확하게 하기 위하여 크랙면에서 1/4 점을 옮기는 특이요소를 사용하여 보다 정도좋은 응력확대계수를 계산하였다. 또한, 임의의 형태의 결함에 대한 유한요소기법들이 Blackburn⁷⁾와, Soboyejo,⁸⁾ deLorenzi,⁹⁾ Nikshkov와 Atluri¹⁰⁾ 등에 의해서 개발 사용되었다. ASTM(E740-80)에서 권장하는 Newman 및 Raju¹¹⁻¹³⁾의 반타원형 표면 결함에 대한 응력확대계수 계산식은 크랙선단의 nodal force를 이용한 유한요소해석을 활용하여 제안되었다. 또한, 관련 범용 유한요소 프로그램의 지속적인 개발로 실제 기기 및 구조물에서의 피로하중 하에서 크랙진전형상도 수치예측이 가능할 수 있게 되었다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 기기 및 구조물의 안전설계 및 피로크랙 수명예측 기술의 한 부분으로서, 임의의 평면 또는 표면크랙에 대한 피로수명 예측 및 파괴강도 평가를 위한 3차원 수치모델링기법을 유한요소법과 선형파괴역학을 이용하여 실제 기기 및 구조물에 흔하게 내재하는 단 · 복수표면결함이 초기결합에서 관통될 때까지의 피로하중에 대한 크랙진전형상 및 파괴강도를 예측 평가하고, 기존의 해석방법과는 해석의 정확성을 비교 · 검토하였다.

2. 해석 절차

본 연구에서는 Fig. 1(a)에 보여진 것처럼 크랙면을 따라 수직인 점에서의 평면을 정의한 다음, 선택된 면에서의 크랙선단 주위 절점변위를 유한요소해석으로부터 계산하였다. 이것은 Paris와 Erdogan(1963)¹⁴⁾의 크랙면에서의 각 점에 대한 파괴강도, 즉 응력확대 계수를 결정하기 위하여 크랙선단 주위 응력장 방정식을 사용하였으

며, 특히 응력확대계수의 해석정도를 높이기 위하여 Henshell과 Barsoum 등이 사용한 1/4 절점 변위법을 사용하였다. 이때 사용한 응력확대계수식은 아래와 같다.⁶⁾

$$K = G \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \cdot \frac{v}{2(1-\nu)} \quad (1)$$

여기서 r, v 는 크랙 선단으로부터 1/4 절점 거리, 크랙 선단 뒤 1/4 절점에서의 크랙 개구 변위이며 G, ν 는 전단계수, 포와송비이다.

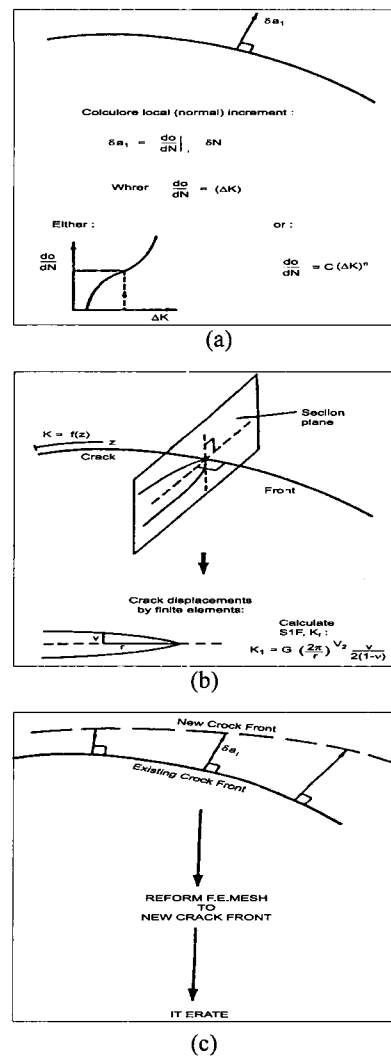


Fig. 1 Modelling the growth of crack fronts with varying stress intensity factors, K_1 , using finite elements and LEFM

Fig. 1(b)에 보인 것처럼 크랙면의 점들에 따라 크랙면에 수직방향에 대한 응력확대계수의 변이 즉 응력확대계수 범위인 ΔK 를 계산하여 Paris의 크랙성장률 방정식 (2)에 의해서 크랙성장률(da/dN)을 구한다. 이때 재료상수 c, m 은 $8.02 \times 10^{-9}, 2.92$ 이며 구한 크랙성장률을 식 (3)에 대입하여 사이클(cycle) 증분(δN)에 대한 크랙길이 증분(δa_i)이 계산되었다.

$$\frac{da}{dN} = c (\Delta K)^m \quad (2)$$

$$\delta a_i = \left(\frac{da}{dN} \right)_i \delta N \quad (3)$$

따라서 정해진 사이클 수에 대한 각 크랙면의 점들에 따라 수직 방향의 계산된 증분 크랙길이 끝을 이므로서 진전된 크랙형태를 알수 있고, Fig. 1(c)에서 처럼 반복수행작업을 통하여 크랙의 전체 진전형태를 구할 수 있었다. Fig. 2는 해석절차에 대한 작업 흐름도(Flow chart)를 나타내고 있으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 크랙진 구조물의 유한요소 모델링
- 2) 크랙 주위에서의 응력확대계수 계산

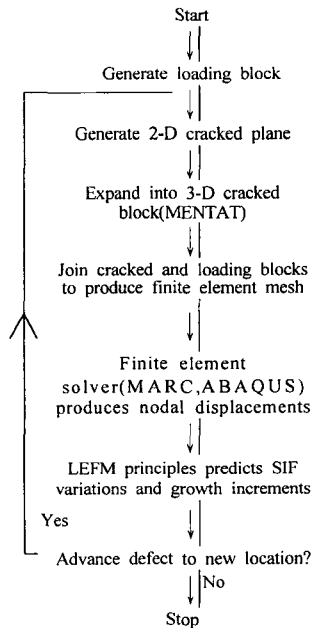


Fig. 2 Schematic of analysis procedure

- 3) 크랙면의 점들에 따라 수직방향에 대한 크랙길이 증분계산
- 4) 정해진 사이클 수에 대한 크랙면의 진전된 크랙길이 계산 및 진전형태 작성
- 5) 2)에서 4)과정 반복작업

3. Simulation 해석

3.1 유한요소 모델링

크랙진 3차원 구조물해석을 위하여 Fig. 3과 같이 2 block으로 나누어 크랙이 없는 하중블럭 (loading block)에서는 작용하중 조건 및 모델(model)크기를 크게 분할하였고 상대적으로 크랙이 있는 균열진 블럭(cracked block)에서는 작게 분할하였다. 균열진 블럭은 결함주위에서 재료의 작은 체적을 나타내면서 보다 정확한 해를 구하기 위하여 아주 미세하게 요소분할하였고 이 크랙진 블럭은 크랙성장에 따라 계속적으로 요소분할시켰다. Fig. 4에 하중블럭을 보였으며 Fig. 5에서는 크랙진 블럭의 2차원 요소분할에 3차원으로 확장된 3차원 모델 및 크랙선단의 요소를 나타내었다.

특히, 크랙면에서는 중간절점이 요소 모서리(edge)로부터 1/4점으로 이동된 특이요소를 사용

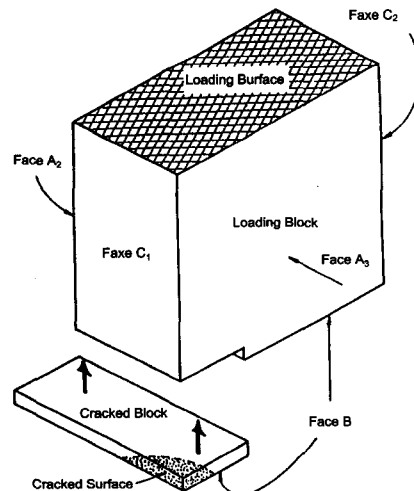


Fig. 3 Creation of 3D finite element model from separate blocks

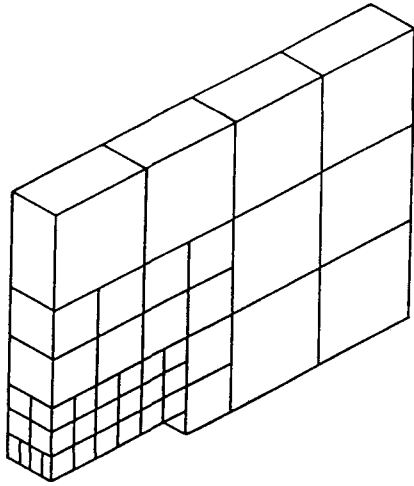


Fig. 4 Loading block for cracked compact tension specimen

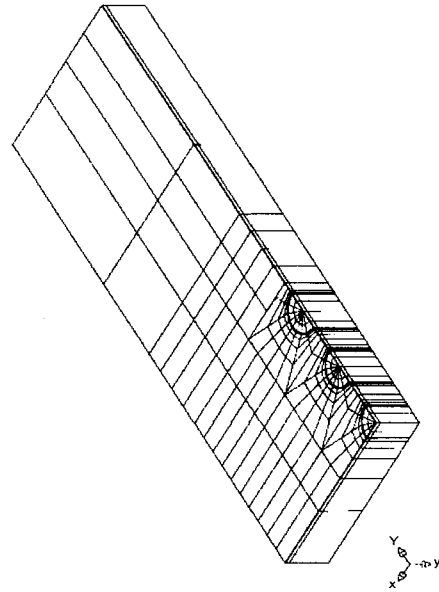


Fig. 6 Modeling of 3D expanded block for 5 small cracks

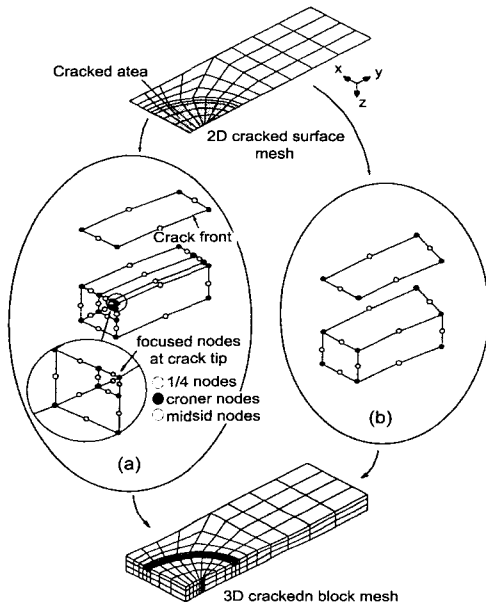


Fig. 5 Expansion of 2D cracked plate into 3D cracked block

하였다.¹²⁾ 크랙진 블록과 하중블럭을 접합시켜 해석을 실시하였으며¹⁵⁾ Fig. 6에는 본 연구에서 수행된 5개의 작은 복수표면크랙에서의 1/2 대칭인 크랙진 block의 2차원 분할에서 3차원으로 확장된 모델을 보였다.

3.2 표면크랙에서의 응력확대계수의 검증

해석대상인 표면크랙의 파괴강도 즉 응력확대계수의 정확도를 검증하기 위하여 Fig. 7과 Fig. 8에 같은 실제 결함형태 및 해석을 위한 타원형, 원형으로 가정했을 경우를 Newman과 Raju의해¹³⁾와 본 연구에서 실시한 해를 비교하였다. 이때 초기 반타원 형태의 실제 결함형상은 관통되기 전까지 반타원 형태로 진전되므로 표면에서 크랙길이가 같은 형태의 경우, 즉 반타원 형태의 초기 실제결함형상, 반타원결함, 반원형결함 때의 응력확대계수를 비교·검토하였다. Fig. 9는 표면결함에서의 상세 부호 표시를 나타내고 있다. 계산된 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 표면결함에서 반타원형 경우 Newman Raju의 응력확대계수값은 본 유한요소 연구결과인 실제 결함형상에서의 표면점과 최심점에서 값보다 16%, 11% 크게 나왔으며 평균적으로는 Newman Raju의 K값보다 5% 낮게 나왔다. 반원형 결함인 경우 역시 Newman과 Raju해가 4% 크게 나왔다.

Newman과 Raju해를 본 수치해석해와 비교할

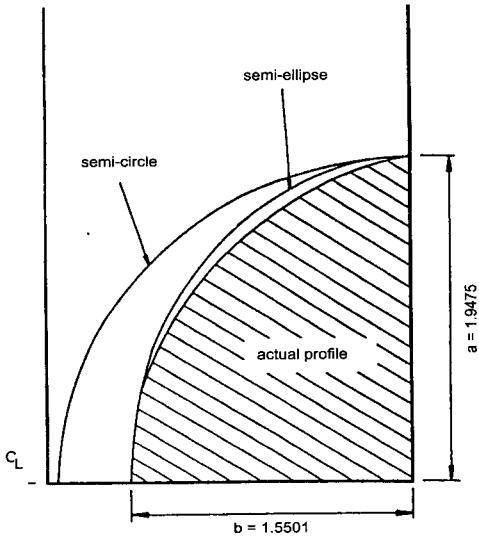


Fig. 7 Intermediate growth profile of surface defect with semi-elliptical and semi-circular fits

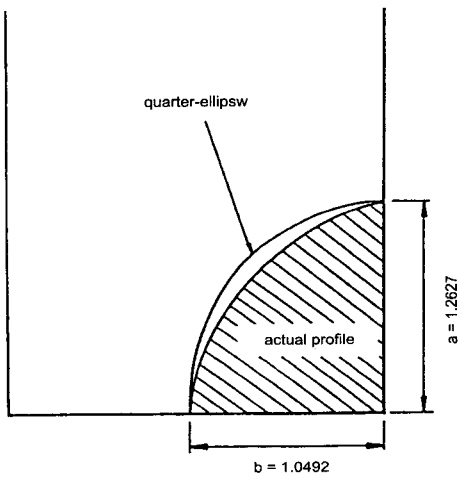


Fig. 8 Intermediate growth profile of surface defect with quarter-elliptical fit

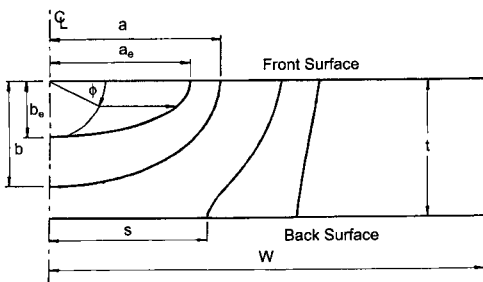


Fig. 9 Nomenclature used to define growth of surface defects

때 5%이내의 해를 얻기 때문에 분명히 본 연구의 해석의 정도를 확인할 수 있으며, 좀더 중요한 것은 반타원 형상이 실제 형상의 결함보다 큰 것으로 보아 상기내용을 확인할 수 있다. Fig. 11에서도 마찬가지로 실제 결함형상과 1/4타원형 결함형상의 해가 교차되는 부분을 제외한 모든 점에서 K 값이 거의 일치하며 평균적으로 5% 이내로 Newman Raju 해가 크기 때문에 본 해석의 정확성이 확인될 수 있었고, 또한 실제 결함형상과 Newman과 Raju해 차이는 크랙형태에서의 영역

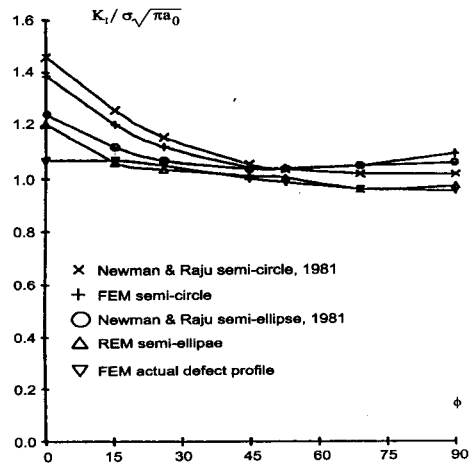


Fig. 10 K variation around tension fatigued surface defects

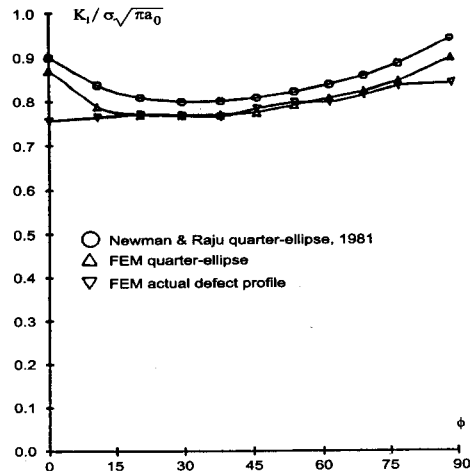


Fig. 11 K variation around tension fatigued surface defects

의 차이에서 기인된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 전체적으로 본 연구에서 채택된 표면크랙에서의 응력확대계수의 수치해석기법의 정확성을 확인하였다.

3.3 해석 크랙 모델의 기하학적 형상 및 하중조건

Fig. 12에서 t 는 판두께, w 는 반폭길이, $2c$ 는 결함의 표면길이, a 는 깊이 방향의 길이를 나타낸다. 각 치수를 좀 더 편리하게 정의하기 위하여 반표면크랙길이에 대한 깊이방향 크랙길이의 비(Asspect ratio) c/a , 판두께에 대한 깊이방향 크랙길이 a/t , 반폭길이에 대한 판두께 t/w 로 나타낼 수 있다. 또한 u, v 는 복수표면크랙 증양점에서의 각각의 간격을 나타낸다. 본 연구에 사용된 하중형태와 초기형상은 Table 1과 같다.

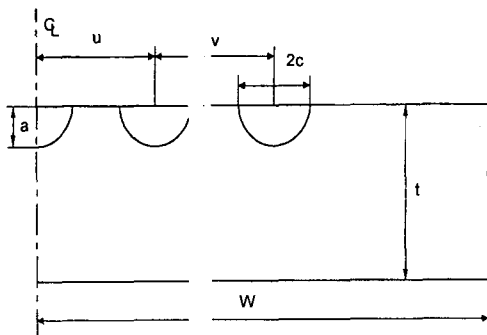


Fig. 12 Nomenclature used to define growth of multiple surface defects

Table 1 Initial geometric profile of surface defects

치수비 하중형태	a/c	a/t	t/w	u	v	결합수
인장 (DOB=0.0)	0.006 (0.15/25)	0.006 (0.15/25)	0.065 (25/400)	0	0	1
인장 (DOB=0.0)	0.006 (0.15/25)	0.006 (0.15/25)	0.065 (25/400)	10	10	5
인장 + 굽힘 (DOB=0.5)	0.006 (0.15/25)	0.006 (0.15/25)	0.065 (25/400)	10	10	5

3.4 해석결과 및 고찰

Fig. 13에 보여진 크랙진전 형상은 인장하중

상태하의 형상비(aspect ratio) a/c 가 0.006 판두께에 대한 깊이방향 a/t 가 0.006, 반폭길이에 대한 판두께 t/w 가 0.06일 경우 상기 해석절차에서 밝힌대로 일련의 71회 반복계산으로부터 얻어진 미리 예측된 크랙진전형상의 모습이다.

Fig. 14는 인장하중 상태하에 피로수명에 따른 깊이방향의 크랙성장 변이를 나타냈다. Fig. 14을 통하여 누수직전의 경우보다 초기부분에서부터 누수이전까지 수명이 거의 소모됨을 알 수 있다. 파손기준 설계시 피로수명에 이러한 내용을 연관시켜 누수전 크랙성장 예측에 활용할 수

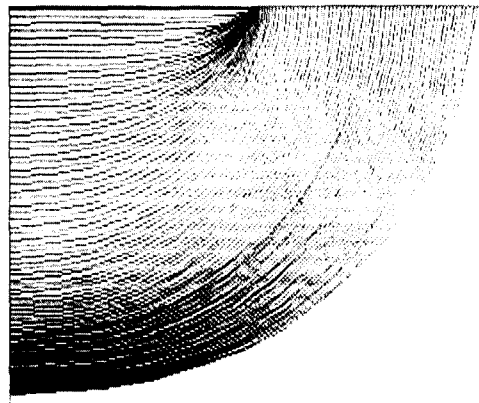


Fig. 13 Fatigue growth of surface slot crack for DOB=0.0

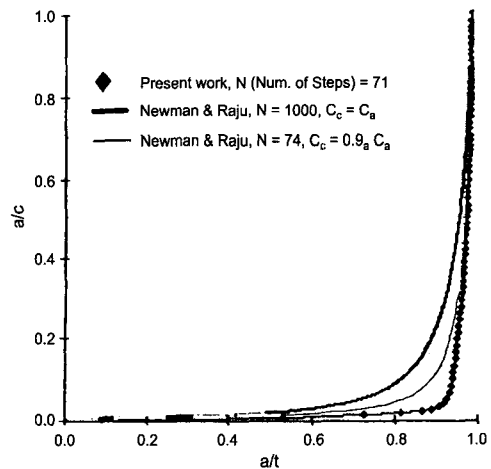


Fig. 14 Variation of crack depth with fatigue life for DOB=0.0

있음이 중요하다고 사료된다. Fig. 14에서 피로 표면크랙 진전에 관한 Newman과 Raju의 제안식과 수정제안식¹³⁾ 즉, Paris표면성장률 계수 C_c 가 Paris의 깊이방향 성장률계수 C_a 와 같을 때, 0.9^n 일 경우를 이번 연구에서 채택한 해석방법의 해와 비교·검토하였다. 여기서 n 은 Paris의 피로크랙 진전률 지수이다. 본 연구에서 채택한 해석방법은 Newman과 Raju에 의해서 수정제안된 식과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 15에서는 형상비(aspect ratio)가 다른 인장상태의 피로성장의 해석결과를 나타냈다. 이 그림을 통하여 결함의 표면길이가 결함초기 또는 성장모습의 예측에 의해 주어진 관통두께 성장이 계산되어 질 수 있으므로 안전검사와 보수기술에 유용하게 활용될 수 있다. 결과적으로 결함의 표면길이를 직접 측정을 통하여 관통두께까지의 성장 임계양을 연관시켜 예측시킬 수 있다. 표면에서 결함성장은 형상비가 1보다 적고 $0.5 \leq a/c \leq 0.7$ 로 향하는 경향이 있으며 관통되어 새는 부분의 깊이방향 결함이 이때를 초과할 경우 발생한다. 이것은 똑같은 초기 형상비의 결함들은 똑같은 경향으로 성장하며 이때 초기 상대적 크랙깊이는 결함형상비의 영향이 크며 결함들은 점진적으로 누수 형상비로 향하여 성장하는 것으로 보여지며 누수 형상비는 초기 형상비와 초기 크랙깊이에 의해 크게 영향을 받는다.

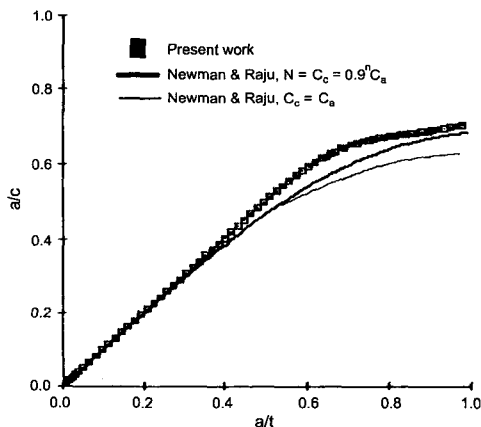


Fig. 15 Variation of aspect ratio for surface slot crack, DOB=0.0

따라서, 본 연구에서 채택된 해석방법이 Newman과 Raju에 의해서 수정 제안된 방법과 비교적 잘 일치함을 보이고 있다.

앞에서 입증된 본해석 기법에 의해서 Table 1에 제시된 5개의 표면크랙 형상에 대하여 인장하중만이 작용 할 경우, 인장과 굽힘하중이 동시에 작용 할 경우의 형상진전 결과를 Fig. 16, Fig. 17에 보였다.

그림에서 초기 5개의 작은 크랙은 서로 접촉 때까지 독립적으로 성장하다 접촉 후 급속도로 합체되어 손톱형태의 한개의 크랙형태로 진전되는 것을 알 수 있다. 좀 더 면밀히 관찰하면 그림에서 세번째 크랙은 다른 두개보다 더 빨리 성장하는 것을 볼 수 있다. 이것은 초기 세번째 반타원형 크랙에 따라 최대 응력확대계수가 첫번째, 두번째 크랙보다 더 크기 때문이다. 또한, 크랙들이 서로 접촉후 오목 경사가 심한 초기 접촉상태가 나중 접촉 상태인 오목 경사가 완만한 형태인 때 보다 훨씬 급속히 진전되는 것을 알 수 있다. 이는 Sobyajo⁸⁾ 등의 실험결과와도 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 유한요소 시물레이션기법은 3가지 다른 크랙성장단계 즉 합체전, 합체, 합체 후에서 복수피로크랙의 형상진전을 알 수 있어 초기 표면결함에서 관통될 때 까지의 진전형상을 예측할 수 있고 이때의 파괴강도, 수명 등이 계산될 수 있어 균열안전설계기술에 유용하게 활용될 수 있다.

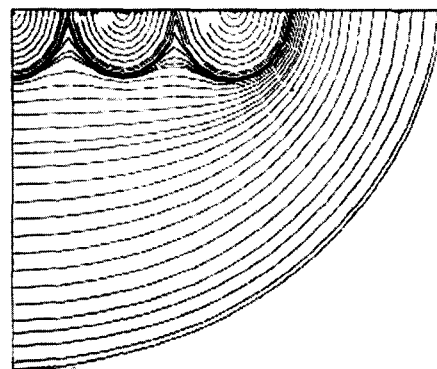


Fig. 16 Fatigue growth of five small cracks under DOB=0.0

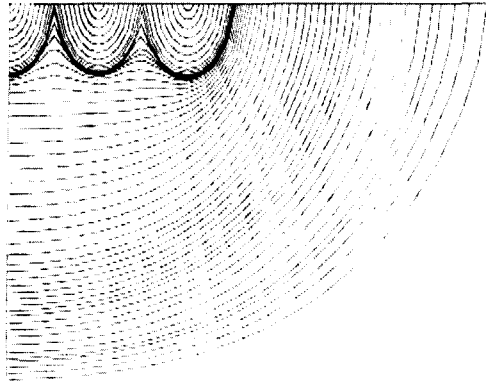


Fig. 17 Fatigue growth of five small cracks under DOB=0.5

4. 결론

본 연구에서는 현재 각종 대형사고의 주 원인이 되고 있으며 기기 및 구조물에서 주로 내재하는 3차원 단·복수표면크랙 등의 진전형상 예측평가의 피로안전설계를 위한 수치모델링기법에 대하여 중점적으로 다루었다. 본 연구에서 검토된 유한요소법에 의한 수치해석기법은 공학상의 실제 문제인 복수 형태의 초기 표면결함에서 관통될 때까지의 피로 크랙형상, 피로수명예측 및 파괴강도 해석에 많은 이점이 있을 것으로 사료되며 추후에는 다양한 크랙에 대한 적용문제, 관련실험 등 실제응용연구에 관한 많은 연계가 필요하다. 또한 본 연구에서 제시된 크랙 부위의 3차원 자동 요소분할, 크랙 부위와 하중부위의 분할 및 접합기법은 해석방법이 보다 간편하며 정확성이 확인되었다.

후 기

본 연구는 2000년도 계명대학교 비사 연구기금으로 이루어 졌음을 알립니다.

참 고 문 헌

1) British Standards Institution, "Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded

Joints," Section 3, BSI PD 6493, 1980.
 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components, 1977.
 3) D. M. Parks, "A Stiffness Derivative Finite Element Technique for Determination of Elastic Crack Tip Stress Intensity Factors," Int. J. Fracture, Vol.10, pp.487-502, 1974.
 4) T. K. Hellen, "On the Method of Virtual Crack Extension," Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.9, pp.187-207, 1975.
 5) R. D. Henshell, K. G. Shaw, "Crack Tip Finite Elements are Unnecessary," Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.9, pp.495-507, 1975.
 6) R. S. Barsoum, "On the Use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics," Int. J. Numer. Methods in Engng., Vol.10, pp.25-37, 1976.
 7) E. M. Remzi, W. S. Blackburn, T. K. Hellen, "Automatic Growth of Planar Cracks in Three Dimensional Geometries," Proceedings of 5th International Conference on Numerical Methods in Fracture Mechanics, pp.129-140, 1990.
 8) W. O. Soboyejo, K. Kishimoto, R. A. Smith, J. F. Knott, "A Study of the Interaction and Coalescence of Two Coplanar Fatigue Cracks in Bending," Fatigue Engng Mater. Struct., Vol.12, No.3, pp.167-174, 1989.
 9) H. G. DeLorenzi, "On the Energy Release Rate and the J-integral for 3-D Crack Configuration," Int. J. Fracture, Vol.19, pp.183-193, 1982.
 10) G. P. Nikishkov, S. N. Atluri, "Calculation of Fracture Mechanics Parameters for an Arbitrary Three-dimensional Crack, by the Equivalent Domain Integral Method," Int. J. Num. Meth. Engng., Vol.24, pp.1801-1821, 1987.
 11) I. S. Raju, J. C. Jr. Newman, "Three-dimensional Finite-element Analysis of Finite-thickness Fracture Specimens," NASA TN D-8414, 1977.
 12) I. S. Raju, J. C. Jr. Newman, "Stress Intensity Factors for a Wide Range of Semi-elliptical Surface Cracks in Finite Thickness Plates,"

- Engng Fract. Mech, Vol.11, No.4, pp.817- 829, 1979.
- 13) J. R. Newman, I. S. Raju, "An Empirical Review of Crack Tip Stress Intensity Factors for Semi-elliptic Crack," Eng. Fract. Mechs., Vol.15, pp.185-92, 1981.
- 14) P. C. Paris, F. Erdogan, "Critical Analysis of Crack Propagation Laws. J. Basic Engng," ASME, Series D, Vol.85, No.4, pp.528-534, 1963.
- 15) R. A. Smith, J. F. Cooper, "A Finite Element Model for the Shape Development of Irregular Planar Cracks," Int. J. Press. Vess. Piping, Vol.36, p.320, 1989.