

인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열의 J -적분 계산식

심도준* · 김윤재* · 최재봉* · 김영진†
(2001년 2월 21일 접수, 2001년 8월 1일 심사완료)

Engineering J -Integral Estimation for Semi-Elliptical Surface Cracked Plates in Tension

Do-Jun Shim, Yun-Jae Kim, Jae-Boong Choi and Young-Jin Kim

Key Words : Finite Element Analysis(유한요소해석), J -integral(J -적분), Limit Load(한계하중), Reference Stress Method(참조응력법), Surface Crack(표면균열)

Abstract

This paper provides a simplified engineering J estimation method for semi-elliptical surface cracked plates in tension, based on the reference stress approach. Note that the essential element of the reference stress approach is the plastic limit load in the definition of the reference stress. However, for surface cracks, the definition of the limit load is ambiguous ("local" or "global" limit load), and thus the most relevant limit load (and thus reference stress) for the J estimation should be determined. In the present work, such limit load solution is found by comparing reference stress based J results with those from extensive 3-D finite element analyses. Validation of the proposed equation against FE J results based on actual experimental tensile data of a 304 stainless steel shows excellent agreements not only for the J values at the deepest point but also for those at an arbitrary point along the crack front, including at the surface point. Thus the present results provide a good engineering tool for elastic-plastic fracture analyses of surface cracked plates in tension.

1. 서 론

결합이 존재하는 구조물에 대한 건전성평가를 수행하기 위해서는 균열의 안정성을 파괴역학적으로 입증해야한다. 이를 위해서는 탄소성 파괴역학(Elastic-Plastic Fracture Mechanics; EPFM) 매개변수인 J -적분을 정확하게 계산할 필요가 있다. 구조물에서 가장 널리 검출되는 반타원 표면균열의 경우, 균열이 3차원적인 파괴거동을 나타내기 때문에 정확한 J -적분을 계산하기 어렵다. 따라서 다양한 형상의 반타원 표면균열에 대한 J -적분 계산식을 제시하기 위해서는 수많은 3차원 유한요소해석을 수

행해야 하는 문제가 있다. 이와 같은 문제를 줄이기 위해 선 스프링 모델(line spring model)⁽¹⁻²⁾이 제안된 바 있으나, 이 방법 또한 유한요소해석을 사용하는 방법으로 많은 시간이 소요된다는 문제점이 있다. 따라서 반타원 표면균열에 대한 공학적 J -적분 계산식이 필요하다.

공학적인 방법 가운데 가장 널리 사용되고 있는 방법이 GE/EPRI법^(3,4)과 참조응력법(reference stress method)⁽⁵⁾이다. GE/EPRI법에서는 균열의 기하학적 형상 및 가공경화지수(n)에 대하여 소성 영향 함수(plastic influence function)를 제시하고 있다. 평판에 존재하는 표면균열에 대한 소성 영향 함수는 참고문헌 (6)과 (7)에 제시되어 있다. GE/EPRI법은 세부적인 유한요소해석을 통해 J -적분값을 계산하므로 비교적 정확하다고 알려져 있으나 전반적으로는 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 이와 같은 부정확성은 해석시 입력조건으로 사용되

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7459 FAX : (031)290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

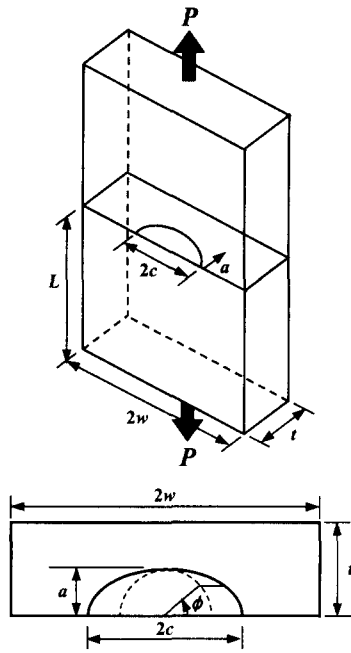


Fig. 1 Schematic illustration of surface cracked plates in tension

는 Ramberg-Osgood 상수가 응력-변형률 곡선의 곡선 적합(curve fitting) 구간 및 방법에 민감하기 때문인 것으로 알려져 있다. 또한, GE/EPRI법에서는 극히 제한적인 경우에 대해서만 식을 제시하고 있어서 실질적인 적용이 어렵다.

참조응력법은 GE/EPRI법과는 달리 사용이 매우 편리하고 해석 결과가 비교적 안정적이기 때문에 R6 평가법⁽⁸⁾ 등에 적용되고 있으나 참조응력의 정의 방법에 따라 해석 결과가 크게 변할 수 있다는 단점이 있다. 참조응력을 정의하기 위해서는 무차원화 하중(normalizing load)이 필요한데, 현재는 비경화(non-hardening) 재료에 대한 한계 하중(limit load)이 무차원화 하중으로 사용되고 있다. 구조물에 대한 한계 하중식이 다양하게 제시되어 있으므로 적절한 한계 하중식의 선택은 용이하다.⁽⁹⁾ 한편, 반타원 표면균열의 경우 한계 하중에 대한 정의 방법이 매우 다양하다. 두 가지로 크게 분류하면, 균열부의 리가먼트(ligament)가 항복(yielding)을 일으키는 하중을 기준으로 정의하는 국부적 한계 하중(local limit load)과 균열면에 작용하는 하중을 기준으로 정의하는 광범위의 한계 하중(global limit load)으로 분류된다. 따라서 참조응력법을 이용하여 표면균열의 J-적분을 정확하게 계산하기 위해서는 어느 한계 하중식이 가장 적합한지 분석할 필요가 있다. 또한 반타원 표면균열의 경우 최대

균열구동력(crack driving force)이 균열의 최심점(deepest point)에서뿐만 아니라 균열선단 임의의 위치에서 발생할 수 있다. 따라서 균열의 최심점에서뿐만 아니라 임의의 위치에서의 J-적분을 계산할 수 있는 공학적 J-적분 계산식이 요구된다.

본 논문의 목적은 인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열에 대한 공학적 J-적분 계산식을 참조응력법에 기초하여 제안하는 것이다

2. 다양한 참조응력과 기존의 유한요소 해석 결과 비교

2.1 기존의 유한요소해석 결과

Fig. 1과 같이 인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열에 대한 GE/EPRI형식의 J-적분 계산식은 참고문헌 (6)~(7)에 제시되어 있으며, 이와 같은 계산식은 재료가 다음과 같은 Ramberg-Osgood 식을 따른다는 가정에서 구하였다.

$$\left(\frac{\epsilon}{\sigma_y/E}\right) = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \quad (1)$$

여기서, σ_y 는 재료의 항복 강도(yield strength)이다. GE/EPRI법에서 J-적분의 소성 성분은 다음과 같이 정의된다.⁽⁷⁾

$$J_p = \alpha \left(\frac{\sigma_y^2}{E} t\right) h_1(n) \left[\frac{P}{P_o}\right]^{n+1} \quad (2)$$

여기서, P_o 는 무차원화 하중으로 다음과 같이 정의된다.

$$P_o = 2wt\sigma_y \quad (3)$$

소성 영향 함수 h_1 은 균열의 기하학적 형상(a/t 와 a/c) 및 가공경화지수(n)에 대한 함수이다. 반면, J-적분의 탄성 성분은 다음과 같이 정의 된다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} = \left(\frac{\sigma_y^2}{E}\right) h_1(n=1) \left[\frac{P}{P_o}\right]^2 \quad (4)$$

여기서, K 는 선형탄성파괴역학 매개변수인 응력확대계수(stress intensity factor)이며, 평면 변형률(plane strain) 상태에 대해서는 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이며 평면 응력(plane stress) 상태에 대해서는 $E'=E$ 이다. 식 (4)에

서 $h_1(n=1)$ 은 탄성재료($n=1$)에 대한 h_1 값을 의미한다. 식 (2)를 식 (4)를 이용하여 무차원화시키면 다음과 같다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \left[\frac{P}{P_o} \right]^{n-1} \quad (5)$$

2.2 참조응력법에 기초한 J-적분 계산

참조응력법에서 J_p 는 다음과 같은 식으로부터 계산된다.^(5,8)

$$\frac{J_p}{J_e} \cong \frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{P}{P_{ref}} \sigma_y \quad (6)$$

여기서, σ_{ref} 는 참조응력, ε_{ref} 는 참조응력에서 정의되는 변형률이며, P_{ref} 는 고려하는 구조물의 참조하중이다. Ramberg-Osgood 재료에 대해서 식 (6)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{J_p}{J_e} \cong \alpha \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{n-1} \quad (7)$$

식 (7)과 식(5)를 보면, 만약 참조하중 P_{ref} 가 다음과 같이 정의된다면 참조응력법의 J_p 와 GE/EPRI 법의 J_p 는 거의 유사할 것이다.

$$P_{ref} = P_o \left(\frac{h_1(n=1)}{h_1(n)} \right)^{1/(n-1)} \quad (8)$$

또한 식 (6)은 응력과 변형률로만 정의된 식이므로 임의의 재료에 대한 J-적분 계산에도 사용될 수 있다는 장점이 있다.

2.3 다양한 참조응력과 유한요소해석 결과 비교

표면균열에 대한 한계 하중은 국부적 또는 광범위의 한계하중으로 정의할 수 있으며, 각 경우에 대하여 다양한 식들이 제시되어 있다. 본 논문에서는 네 가지 식에 대하여 간략히 정리하였다.

첫 번째 식은 Goodall⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 광범위의 한계 하중식으로서 굽힘 모멘트와 인장하중이 동시에 작용하는 평판에 대한 참조응력을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$\sigma_{ref} = \frac{(\sigma_b + 3\gamma\sigma_m) + \left\{ (\sigma_b + 3\gamma\sigma_m)^2 + 9\sigma_m^2 h \right\}^{0.5}}{3h} \quad (9)$$

$$h = (1-\gamma)^2 + 2\gamma(\psi - \gamma)$$

여기서, σ_m 과 σ_b 는 각각 균열이 없는 면에 작용하는 막응력(membrane stress)와 굽힘응력이며, ψ 와 γ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \frac{a}{t} ; \gamma = \frac{ac}{wt} \quad (10)$$

한편, 참조응력은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\sigma_{ref} = \frac{P}{P_L} \sigma_y \quad (11)$$

여기서, P_L 은 균열이 존재하는 구조물의 강소성(rigid-plastic) 한계 하중으로서, 식 (9)를 이용하여 인장하중만 작용하는 경우($M=\sigma_b=0$)에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_L = 2wt\sigma_y \left[\frac{h}{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + h}} \right] \quad (12)$$

$$h = (1-\gamma)^2 + 2\gamma(\psi - \gamma)$$

두 번째 식은 Sattari-Far⁽¹¹⁾에 의해 제안된 식으로 굽힘 모멘트와 인장하중이 동시에 작용하는 평판에 대한 한계 하중을 다음과 같은 항복계적의 형태로 나타내었다.

$$\frac{2}{3} g(\zeta) \frac{\sigma_b}{\sigma_y} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_y} \right)^2 = (1-\zeta)^2 \quad (13)$$

$$g(\zeta) = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0.75} \zeta^3$$

$$\zeta = \begin{cases} ac/t(c+t) & \text{for } w > c+t \\ 2ac/tw & \text{for } w \leq c+t \end{cases} \quad (14)$$

이 식은 인장에 대해서는 $a/t \leq 0.8$, 굽힘에 대해서는 $a/t \leq 0.6$ 인 경우에만 유용하다. 인장하중만 작용하는 경우($\sigma_b=0$)에 대한 한계 하중은 다음과 같다.

$$P_L = 2wt\sigma_y(1-\zeta) \quad (15)$$

세 번째 식은 Miller⁽¹²⁾에 의해 제안된 광범위의 한계 하중식으로 다음과 같다.

$$P_L = 2wt\sigma_y \left[1 - \frac{\pi ac}{4tw} \right] \quad (16)$$

마지막 식은 Miller⁽¹²⁾에 의해 제안된 국부적 한계하중식이다.

$$P_L = 2wt\sigma_y \left[1 - \frac{\pi ac}{2t(2c+t)} \right] \quad (17)$$

Fig. 2는 a/t 에 따른 네 가지 식의 변화를 $a/c=0.2$ 인 경우와 $a/c=1.0$ 인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 네 가지 식에 의해 계산된 한계 하중은 얇은 균열(shallow crack)에서는 유사하게 나타났으나 균열의 깊이(a/t)가 증가할수록 차이가 증가하였다. 한편, a/c 에 의한 영향은 a/t 에 의한 영향에 비해서 작게 나타났다.

참조응력법에 가장 적합한 한계 하중을 제시하기 위해 유한요소해석에 의해 계산된 $h_I^{(7)}$ 및 식 (8)을 이용하여 계산된 P_{ref} 와 네 가지 식에 의해 계산된 한계 하중을 비교하였다. 한편, 식 (8)의 $h_I(n=1)$ 을 계산하기 위해서는 식 (4)을 이용하였으며, 식 (4)의 K 값을 계산하기 위해서는 Raju-Newman 식⁽¹³⁾을 이용하였다.

Fig. 2는 식 (12)~(17)에서 구한 $P_L/(2wt\sigma_y)$ 과 유한요소해석으로부터 구한 $P_{ref}/(2wt\sigma_y)$ 를 비교한 것

으로, 표면균열의 최심점($\phi=\pi/2$)에서의 값을 비교하였으며 $n=5, 10, 15$ 에 대하여 비교하였다. Fig. 2에서 n 값의 변화는 $P_{ref}/(2wt\sigma_y)$ 값에 큰 영향을 미치지 않았다. 또한 유한요소해석으로부터 구한 $P_{ref}/(2wt\sigma_y)$ 값은 Goodall식(식 (12))과 가장 잘 일치하였다. 따라서 Goodall식이 참조응력법에 가장 적합한 식이라고 할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 표면균열의 경우 최대 J -적분값이 균열의 최심점에서 뿐만 아니라 균열 선단 임의의 위치(임의의 ϕ)에서 나타날 수 있다. 따라서 참조응력법에 기초한 J -적분 계산식이 임의의 위치에서도 적용 가능한지 분석할 필요가 있다. Fig. 3은 유한요소해석에 의해 계산된 표면점($\phi=0$)에서의 h_I 을 이용하여 구한 $P_{ref}/(2wt\sigma_y)$ 값을 Goodall식 및 Miller(global)식의 $P_L/(2wt\sigma_y)$ 값들과 비교한 것이다. 최심점에서와 마찬가지로 표면점에서의 $P_{ref}/(2wt\sigma_y)$ 값은 Goodall식과 잘 일치하였고, $a/c=1.0$ 인 경우에만 약 10%의 차이를 나타내었으나, 최심점에 비해 중요도가 낮은 표면점에서 이

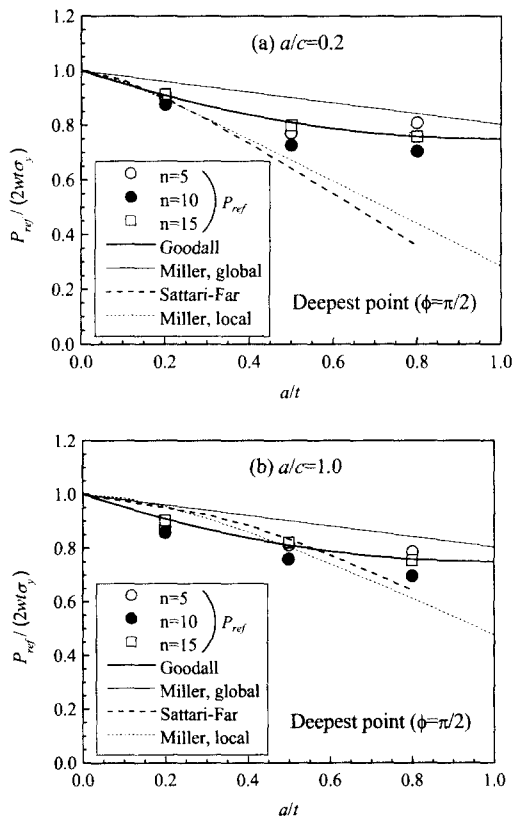


Fig. 2 Comparison of reference loads P_{ref} s determined from the FE results with limit load solutions, $\phi=\pi/2$: (a) $a/c=0.2$ and (b) $a/c=1.0$

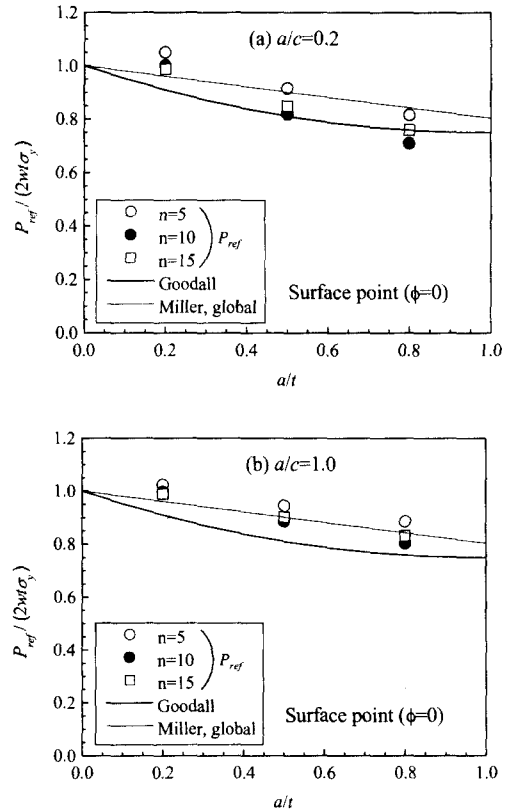


Fig. 3 Comparison of reference loads P_{ref} s determined from the FE results with limit load solutions, $\phi=0$: (a) $a/c=0.2$ and (b) $a/c=1.0$

정도의 오차는 공학적인 측면에서 무시할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 균열의 최심점뿐만 아니라 임의의 위치(표면점 포함)에서의 J -적분을 계산하는데 있어서 동일한 무차원화 하중(또는 참조 응력)을 사용할 수 있다는 결론을 얻었다.

R6 평가법⁽⁸⁾에서 제시하고 있는 J -적분 계산식을 고려하여 인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열에 대한 계산식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (18)$$

$$\sigma_{ref} = \frac{P}{P_{ref}} \sigma_y$$

$$P_{ref} = 2wt\sigma_y \left[\frac{h}{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + h}} \right] \quad (19)$$

$$h = (1 - \gamma)^2 + 2\gamma(\psi - \gamma); \psi = \frac{a}{t}; \gamma = \frac{ac}{wt}$$

한가지 중요한 사실은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 유한요소해석 결과는 모두 $w/c=4$ 인 경우에 대한

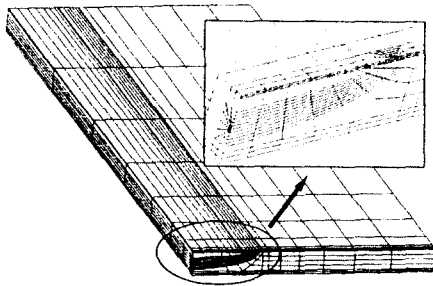


Fig. 4 A typical FE mesh for surface cracked plate with the magnified view for the crack tip region

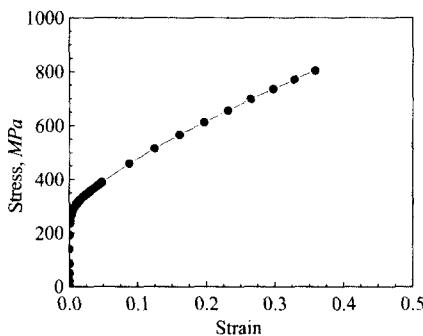


Fig. 5 Stress-strain data for the SA312 TP304 stainless steel

결과들이며 식 (19)도 w/c 에 대해서는 제한이 없다. 또한, 식 (19)는 평판의 균열단면 전체가 소성을 일으키는 시점을 한계 하중으로 가정하고 있기 때문에 평판의 폭(w)이 증가함에 따라 균열부에서 발생하는 국부적인 소성붕괴를 고려하지 못한다. 따라서 w/c 의 변화가 J -적분 계산식에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 다음 절에서는 다양한 w/c 에 대한 유한요소해석을 통해 이에 대한 분석을 수행하였다.

3. 유한요소해석

본 절에서는 Ramberg-Osgood 재료와 같은 거동을 나타내지 않는 실제 재료에 대하여 앞서 제안된 식을 적용하여 그 유용성을 검증하고, 다양한 w/c 에 대하여 식 (19)의 유용성을 분석하기 위해 수행한 유한요소해석에 대해 서술하였다.

3.1 해석모델 및 해석방법

인장하중이 작용하고 표면균열이 존재하는 평판 (Fig. 1)에 대하여 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁴⁾를 사용하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였으며, 20절점 등계수 사각주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였다. 다양한 a/t , a/c , w/c 에 대해 해석을 수행하였으며, 특히 w/c 는 4에서 20까지 넓은 범위에 걸쳐 해석을 수행하였다. 본 논문에서 수행한 유한요소해석에 대한 각 경우를 Table 1에 정리하였다. 모든 경우에 대하여 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 수행하였으며, 균열선단의 각 위치(ϕ)에서 J -적분값을 산출하였다. 해석에 사용된 재료 물성치는 SA312 TP304 스테인레스강에 대하여 50°C에서 수행된 준정적(quasi-static) 실험결과⁽¹⁵⁾

Table 1 Cases considered in the present FE study

w/c	a/t	a/c	w/c	a/t	a/c
4	0.2	0.2	8	0.2	0.2
4	0.2	1	10	0.2	0.2
4	0.5	0.2	10	0.5	1
4	0.5	1	20	0.2	0.2
6	0.2	0.2	20	0.5	1

Table 2 Material properties for SA312 TP304

E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ν
204	269	559	0.3

를 사용하였으며, 응력-변형을 곡선 및 재료물성치를 각각 Fig. 5와 Table 2에 정리하였다.

유한요소모델을 검증하기 위해 탄성해석을 수행하여 각 위치에서 산출한 J -적분값을 Raju-Newman식의 결과와 비교하였다. Fig. 6에 나타낸

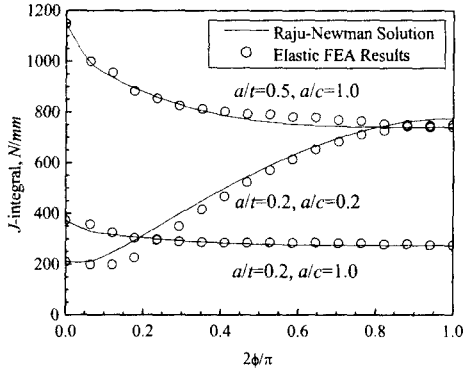


Fig. 6 Comparison of the elastic J values along the crack front from the present FE analysis with the Raju-Newman solution

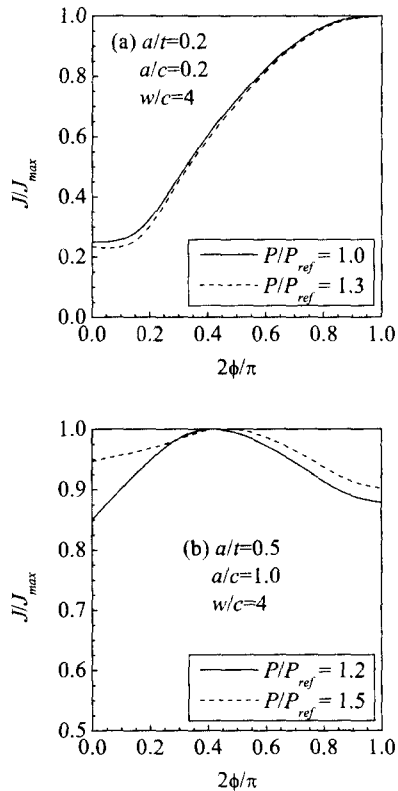


Fig. 7 Variations of J/J_{max} with the angular location ϕ for various values of a/t and a/c

바와 같이 다양한 a/t 와 a/c 에 대하여 두 결과가 잘 일치하여 해석모델의 타당성을 검증하였다.

3.2 해석결과

Fig. 7은 다양한 a/t 와 a/c ($w/c=4$ 고정)에 대하여 균열선단 위치(ϕ)에 따른 J -적분값의 변화를 각각 다른 두 가지 하중에서 나타낸 것이다. $a/t=0.2$, $a/c=0.2$ 인 경우에는 최대값이 $\phi=\pi/2$ 에서 나타났으며, $a/t=0.5$, $a/c=1$ 인 경우에는 최대값이 약 $\phi=\pi/4$ 에서 나타났다. 즉, J -적분의 최대값은 균열의 형상에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 유한요소해석을 통해 세 가지 위치($\phi=0$, $\phi=\pi/3$, $\phi=\pi/2$)에서 산출한 J -적분값과 참조응력법(식 (18)과 식 (19))을 이용하여 계산한 결과를 비교한 것이다. Fig. 8에 도시한 유한요소해석 결과는 a/t 가 0.2에서 0.5, a/c 가 0.2에서 1까지 변하고 w/c 는 4로 고정된 경우에 대한 결과들이다. 또한 각 위치에서의 J -적분값은 그 위치에서 Raju-Newman식을 이용하여 계산한 탄성성분(J_e)으로 무차원화하였다. 참조응력법에 의한 계산결과는 다양한 a/t 와 a/c 에 대하여 잘 일치하였을 뿐만 아니라, 균열선단의 다양한 위치에 대해서도 잘 일치하였으나 표면점에서는 약간의 차이를 나타내었다. 이는 표면점에서 Goodall식을 이용한 결과가 유한요소해석결과와 차이를 나타냈기 때문이다(Fig. 3). 하지만 본 논문에서 제시한 공학적 계산방법의 간단성을 고려한다면 이 정도의 오차는 무시할 수 있다.

J -적분 계산에 w/c 가 미치는 영향을 분석하기 위해 w/c 를 4에서 20까지 변화시켜가며 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과를 분석한 결과 w/c 가 P_{ref} 에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 이에 대한 보정을 수행하였으며 최종적인 P_{ref} 에 대한 식은 다음과 같다.

$$P_{ref} = 2wt\sigma_c \eta \left[\frac{h}{y + \sqrt{y^2 + h}} \right] \tag{20}$$

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{for } w/c \leq 4 \\ -0.01(w/c) + 1.04 & \text{for } 4 \leq w/c \leq 9 \\ 0.95 & \text{for } w/c \geq 9 \end{cases}$$

여기서, h 는 식 (19)의 h 와 동일하며, η 는 P_{ref} 에 w/c 가 미치는 영향에 대한 보정계수로서, $4 < w/c < 9$ 인 경우에만 변화가 있었으며, $w/c \leq 4$ 또는 $w/c \geq 9$ 인 경우에는 일정한 값을 나타냈다. Fig. 9는 $a/t=a/c=0.2$ 로 고정되어 있고 다양한 w/c 에 대해 해석을 수행한 결과를 나타낸 것으로서 참조응력법(식 (18)과 식 (20))을 이용하여 계산한 결과와 잘 일치하였다

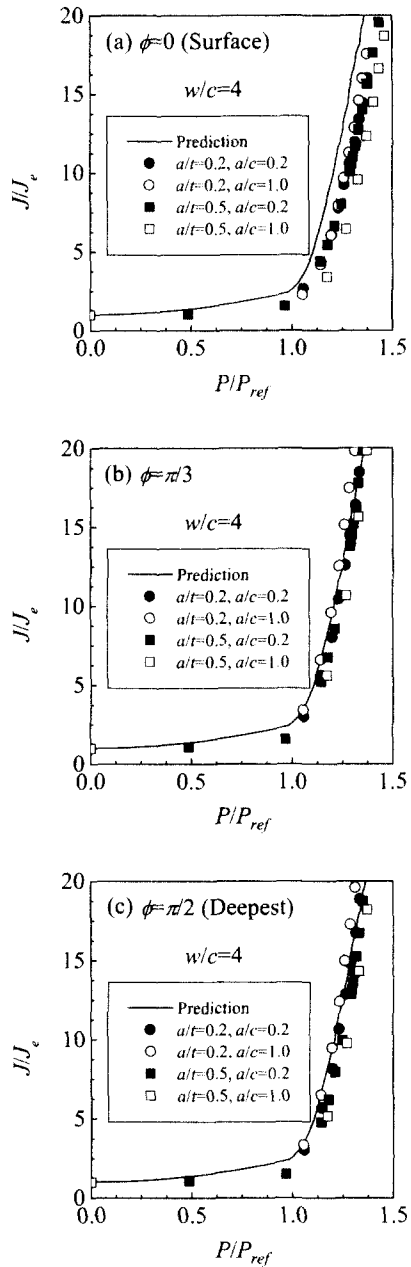


Fig. 8 Comparison of the proposed J estimation equation with the FE results, at three different locations along the crack front for various values of a/t and a/c

4. 토 론

본 논문에서 제시한 인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열에 대한 공학적 J -적분 계산식(식 (18)과 식 (20))은 표면균열의 최심점

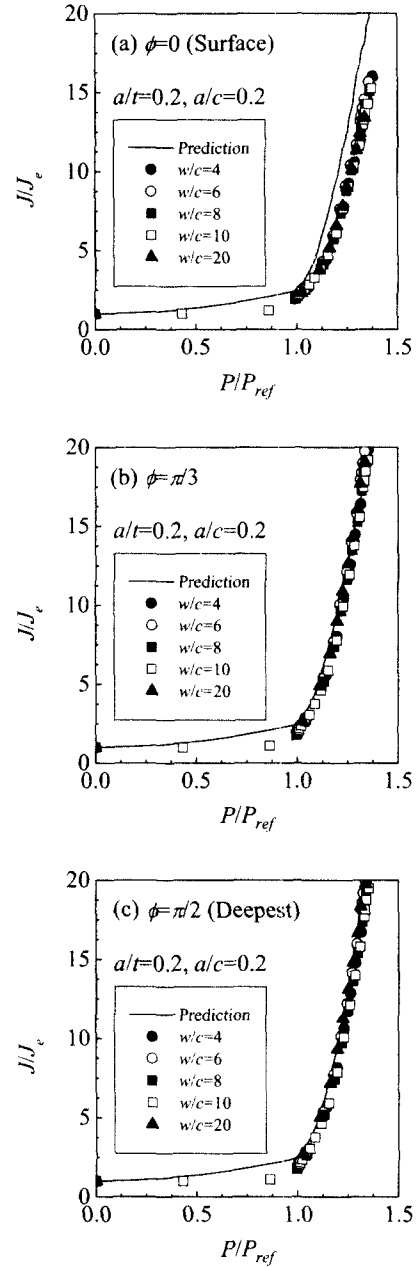


Fig. 9 Comparison of the proposed J estimation equation with the FE results with $a/t=0.2$ and $a/c=0.2$, at three different locations along the crack front : effect of w/c

에서 뿐만 아니라 균열선단 임의의 위치에서의 J -적분값을 계산할 수 있다. 또한, 유한요소해석을 통해 다양한 기하학적 형상(a/t , a/c , w/c)에 대해서도 적용 가능하다는 것을 입증하였다. 한편, GE/EPRI형식의 계산식에서는 특정 균열형상이나

특정 균열선단 위치에서의 J 값을 계산하기 위해서는 각 경우마다 3차원 유한요소해석을 수행하여 h_I 값을 구해야 하는 어려움이 있다. 또한, Ramberg-Osgood 상수를 결정하기 위한 곡선적합 방법에서 많은 오차가 발생한다.⁽¹⁶⁾ 본 논문에서 제시한 공학적 J -적분 계산식은 이와 같은 문제를 해결할 수 있으며, 수식이 간단하므로 다양한 형상과 다양한 하중형태에 대해서도 적용이 용이하다. 예를 들면, 굽힘 모멘트와 인장하중이 동시에 작용하는 평판에 대한 J 값을 계산하기 위해서는 이에 대한 적합한 참조응력을 선택하기만 하면 된다. 이에 대해서는 향후에 연구를 수행할 예정이다.

5. 결 론

본 논문에서는 인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열에 대한 공학적 J -적분 계산식을 참조응력법에 기초하여 제안하였다. 이를 위해 먼저 참조응력법에 적합한 한계 하중식(참조응력)을 결정하였다. 본 논문에서 제안한 공학적 J -적분 계산식은 표면균열의 최심점 뿐만 아니라 균열선단 임의의 위치에서도 적용 가능하다. 또한, 유한요소해석을 통해 w/c 가 J -적분값에 작은 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 본 논문에서는 이에 대한 보정식을 제안하였다. 제안된 공학적 J -적분 계산식을 304 스테인레스강의 실제 재료물성을 이용한 유한요소해석 결과와 비교하여 제안된 계산식을 검증하였다. 제안된 공학적 J -적분 계산식은 평판에 존재하는 표면균열에 대한 탄소성과파역학 해석에 널리 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Lee, H. and Parks, D.M., 1995, "Enhanced Elastic-Plastic Line-Spring Finite Elements," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 32(16), pp. 2393~2418.
- (2) 이준성, 김영진, 양원호, 최용식, 1990, "선 스프링 모델에 의한 2개 표면균열의 상호간섭 해석," 대한기계학회논문집 제14권 제3호, pp. 610~616.
- (3) Kumar, V. and German, M.D., 1988, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," EPRI Report NP-5596.
- (4) Zahoor, A., 1991, "Ductile Fracture Handbook," Novotech Corp.
- (5) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (6) Yagawa, G., Kitajima, Y. and Ueda, H., 1993, "Three-Dimensional Fully Plastic Solutions for Semi-Elliptical Surface Cracks," *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 53, pp. 457~510.
- (7) McClung, R.C., Chell, G.G., Lee, Y.D., Russel, D.A. and Orient, G.E., 1999, "Development of a Practical Methodology for Elastic-Plastic and Fully Plastic Fatigue Crack Growth," NASA Report NASA/CR-1999-209428.
- (8) 1999, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 3, British Energy Generation Ltd.
- (9) Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (10) Goodall, I.W., 1999, "C* for Partially-Penetrating Semi-Elliptical Flaws in Plates: Propagation Through the Thickness," ICON Report ME 196/01 Issue 2.
- (11) Sattari-Far, I., 1994, "Finite Element Analysis of Limit Loads for Surface Cracks in Plates," *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 57, pp. 237~243.
- (12) Miller, A.G., 1988, "J Estimation for Surface Defects; Further Results," CEGB Memorandum TPRD /B/SM/SF95/M88.
- (13) Raju, I.S. and Newman Jr., J.C., 1979, "Stress Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, pp. 817~829.
- (14) 2000, "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.
- (15) Kim, Y.J., Suh, M.W., Jun, H.K., Park, Y.W. and Choi, Y.H., 1997, "Development of Expert System for Nuclear Piping Integrity," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 174, pp. 69~78.
- (16) 허남수, 김윤재, 김영진, 2001, "원자력 배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 대한기계학회논문집(A) 제25권 제4호, pp. 741~747.