

실린더에 존재하는 축방향 표면균열에 대한 공학적 J -적분식 (II) - 최적참조응력에 기초한 방법 -

김진수* · 김윤재* · 김영진†

(2002년 5월 3일 접수, 2002년 8월 16일 심사완료)

Engineering J -Integral Estimation for Internal Axial Surface Cracks in Cylinders (II) -Optimised Reference Stress Based Estimation-

Jin-Su Kim, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

Key Words : Axial Surface Crack(축방향 표면 균열), J Estimation(J 예측), Finite Element Analysis(유한요소해석), Reference Stress(참조 응력), Internal Pressure(내압)

Abstract

This paper provides an reference stress based J estimation equation for cylinders with finite internal axial surface cracks under internal pressure. In part I, the J estimation equation based on deformation plasticity using Ramberg-Osgood (R-O) materials is proposed. In this paper, the developed GE/EPRI-type solutions are then re-formulated based on the reference stress concept. Such a re-formulation provides a simpler equation for J , which are then further extended to combined internal pressure and bending. The proposed reference stress based J estimation equation is compared with elastic-plastic 3-D FE results using actual stress-strain data for a Type 304 stainless steel. Good agreement between the FE results and the proposed reference stress based J estimations provides confidence in the use of the proposed method to elastic-plastic fracture mechanics of pressurised piping.

1. 서 론

Part I⁽¹⁾에서는 실린더에 존재하는 축방향 표면균열에 대한 J -적분 예측식을 변형 소성(deformation plasticity) 이론에 기초한 GE/EPRI 방법^(2,3)에 근거하여 제시하였다. 이 방법은 J -적분을 계산하기 위해 소성역 영향함수(plastic influence function)를 사용한다. 소성역 영향함수는 균열 형상 및 변형률 경화지수(strain hardening exponent)의 영향을 받는다. Part I에서는 다양한 3 차원 유한요소해석으로부터 J -적분 예측에 필요한 소성역 영향함수를 얻었으며, 균열형상, 균열각 위치 및 변형률 경화지수에 따른 값을 테이블화하여 나타내었다. 이 방

법은 변형 소성 이론을 따르는 재료에 대해서는 매우 정확한 예측결과를 나타낸다.

그러나 변형소성이론에 기초한 방법은 많은 문제점을 안고 있다. 첫째, 이 방법은 재료 인장 데이터를 R-O(Ramberg-Osgood) 재료로 이상화하기 때문에, R-O 이상화 방법에 매우 민감하다. 일반적으로 R-O 이상화 방법은 실제 재료에 대한 인장 데이터를 제대로 모사하지 못하며, 따라서 J -적분 계산시 부정확한 계산결과를 초래할 수 있다.^(4,5) 둘째, 소성역 영향함수를 계산하기 위해 많은 유한요소해석이 필요하므로 복잡 하중과 같이 복잡한 문제에 대해서는 적용하기 매우 어렵다. 셋째, 각 균열각에 따른 J -적분을 예측하기 위해서는 해당 위치에서의 소성역 영향함수가 필요하므로 임의의 균열각에 대한 J -적분 예측이 매우 어렵다. 넷째, 고온 크리프 거동을 보이는 일반 재료에 대한 C^* -적분 예측시, 부정확한 결과를 초래한다. 다섯째, 확률론적 해석을 효율적으로 수행하기 위해

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

서는 간단하면서 정확한 예측식이 필요하다. 그러나 이 방법은 매우 복잡하며 특히 소성영역 영향 함수를 결정하기 위해 내삽(interpolation) 등의 많은 노력이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 기존 방법의 단점을 보완한 새로운 J-적분 예측식을 제시하고자 한다. 이 방법은 변형 소성에 기초한 방법에 참조응력(reference stress)⁽⁶⁾ 개념을 도입한 것이다. 이를 위해 Part I의 결과를 재정리하여 새로운 개념의 참조 응력을 정의하였으며, 이로부터 간편하고 정확한 J-적분 예측식을 제시하였다. 제시된 J-적분 예측식은 유한요소해석결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

2. J-적분 예측식

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 내압 p를 받는 배관에 존재하는 축방향 반타원 균열에 대한 J-적분 예측식을 제시하고자 한다.

R-O 재료의 경우, J-적분의 소성성분 J_p는 균열 각 위치 φ에 대해 다음과 같다.⁽²⁾

$$J_p(\phi) = \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) h_1 \left(\frac{R_m}{t}, \frac{a}{t}, \rho, \phi; n \right) \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n+1} \quad (1)$$

여기서, ρ는 식 (2)로 정의되는 무차원 균열길이, h₁은 소성영역 영향함수로 Part I의 Table 2~4에 제시되어 있다.

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{R_m t}} \quad (2)$$

탄성의 경우(n=1), J-적분의 탄성성분 J_e는 식

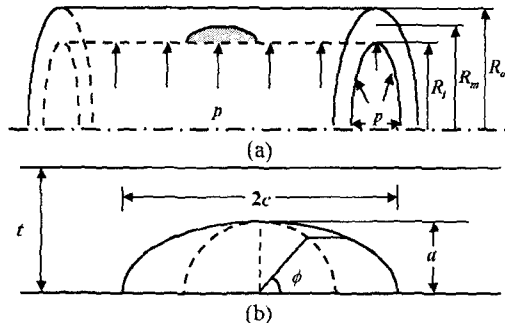


Fig. 1 Schematic illustration for a cylinder with a finite internal axial surface crack, under internal pressure p: (a) cylinder geometry and (b) crack geometry

(1)에서부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_e(\phi) = \alpha \frac{\sigma_y^2}{E} (t-a) h_1(\phi; n=1) \left(\frac{p}{p_L} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 h₁(φ, n=1)은 탄성 재료(n=1)에 대해 균열각 φ에서의 소성영역 함수이며, Part I의 Table 1로부터 결정할 수 있다. 식 (1)을 식 (3)으로 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{J_p(\phi)}{J_e(\phi)} = \alpha \frac{h_1(\phi, n)}{h_1(\phi, n=1)} \left[\frac{p}{p_L} \right]^{n-1} \quad (4)$$

Fig. 2는 n에 대한 h₁(φ, n)/h₁(φ, n=1)값의 변화를 나타낸 것이다. h₁(φ, n)/h₁(φ, n=1)은 R_m/t, a/t, ρ 및 n에 매우 민감하며 균열각 위치(φ, Fig. 1(b))에 따라서도 매우 크게 변화한다.

p_L 대신 새로운 무차원 하중인 p_{ref}를 도입하여 식 (4)를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{J_p(\phi)}{J_e(\phi)} = \alpha \left\{ \frac{h_1(n, \phi)}{h_1(n=1, \phi)} \left[\frac{p_{ref}}{p_L} \right]^{n-1} \right\} \left[\frac{p}{p_{ref}} \right]^{n-1} \quad (5)$$

여기서 h₁(n, φ)/h₁(n=1, φ)와 p_{ref}/p_L는 무차원 변수이다. 식 (5)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p(\phi)}{J_e(\phi)} = \alpha H_1 \left[\frac{p}{p_{ref}} \right]^{n-1} \quad (6)$$

여기서 H₁은 R_m/t, a/t, ρ, φ 및 n의 함수이다. 본 연구에서 제시할 J-적분 예측식의 기본 개념은 p_{ref}를 적절히 정의함으로써 H₁에 대한 R_m/t, a/t, ρ, φ 및 n의 영향을 최소화할 수 있다는 것이다.^(6,7) 본 연구에서는 이러한 p_{ref}를 최적참조하중(optimized reference load) p_{oR}이라 정의하였다. p_{oR} 결정에 대한 보다 자세한 설명은 저자의 전보⁽⁸⁾에 기술되어 있다. Part I에서 수행한 유한요소해석결과를 재정리하여 p_{oR}을 다음과 같이 제시하였다.

$$p_{oR} = [A \ln(\rho) + B] \sigma_y \frac{t}{R_m} \quad (7)$$

$$A = \left[-1 + 0.847 \tanh \left(0.352 \frac{R_m}{t} \right) \right] \frac{a}{t} + 0.006$$

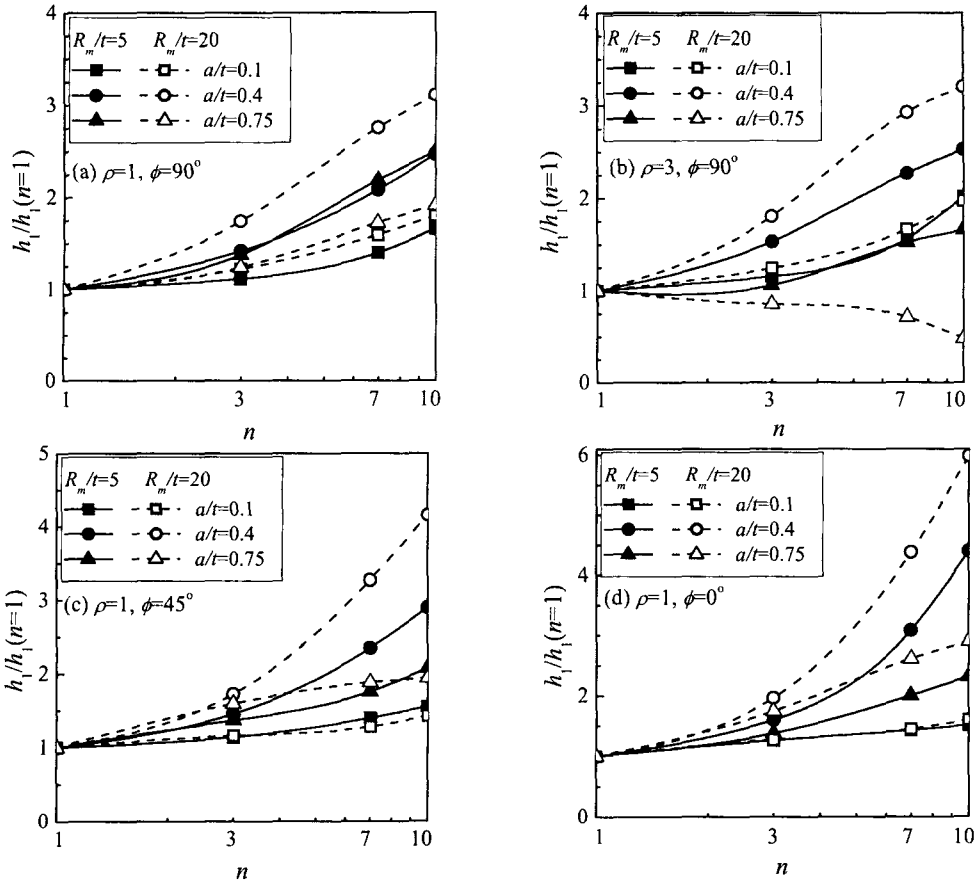


Fig. 2 Variations of $h_1(n)/h_1(n=1)$ values with n for various values of R_m/t and a/t : (a) $\rho=1, \phi=90^\circ$ (b) $\rho=3, \phi=90^\circ$ (c) $\rho=1, \phi=45^\circ$ and (d) $\rho=3, \phi=0^\circ$

$$B = \left[-1 + 0.751 \tanh\left(0.256 \frac{R_m}{t}\right) \right] \frac{a}{t} + 2 - 0.98 \tanh\left(0.312 \frac{R_m}{t}\right)$$

식 (7)의 마지막 항은 원주방향 응력에 대한 균열없는 실린더의 한계하중이다. 식 (7)은 유한요소 해석결과에 기초하고 있기 때문에 $0.1 \leq a/t \leq 0.75$, $0.5 \leq \rho \leq 3.0$ 인 경우에 유효하다. 그러나 이 식은 실제 균열 형상 범위인 $0.05 \leq a/t \leq 0.8$, $0.3 \leq \rho \leq 4.0$ 까지 외삽하여 확대 적용할 수 있다고 판단된다.

Fig. 3은 식 (6)에서 $p_{ref} = p_{oR}$ 이라 할 때, H_I 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 H_I 의 변화폭은 $h_1(n, \phi)/h_1(n=1, \phi)$ 에 비해 매우 적다. 균열 최심점 ($\phi=90^\circ$)의 경우, n 에 대하여 $h_1(n, \phi)/h_1(n=1, \phi)$ 값이 0.5~3.5로 변화하는데 비하여 H_I 은 0.5~1.4로 변화한다. 가장 큰 변화폭을 가지는 표면점 ($\phi=0^\circ$)의 경우, $h_1(n, \phi)/h_1(n=1, \phi)$ 값이 0.8~6.0로 변화하지만 H_I 은 0.6~1.8로 변화한다. 따라서 식 (6)에서 H_I

은 $h_1(n, \phi)/h_1(n=1, \phi)$ 에 비해 상대적으로 1에 가까워지므로 식 (6)은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \left[\frac{p}{p_{oR}} \right]^{n-1} \tag{8}$$

식 (8)은 H_I 값이 R_m/t 와 n 에 대하여 조금씩 변화하므로 정확한 것은 아니다. 그러나 식 (8)은 공학적으로 근사화된 값이며, 3장에서 식 (8)에 대한 타당성을 입증할 예정이다. 이러한 참조응력을 이용한 방법의 가장 큰 장점은 일반 응력-변형률 선도에 적용할 수 있다는 것이다.

R-O 재료의 경우, 소성 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_p = \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \tag{9}$$

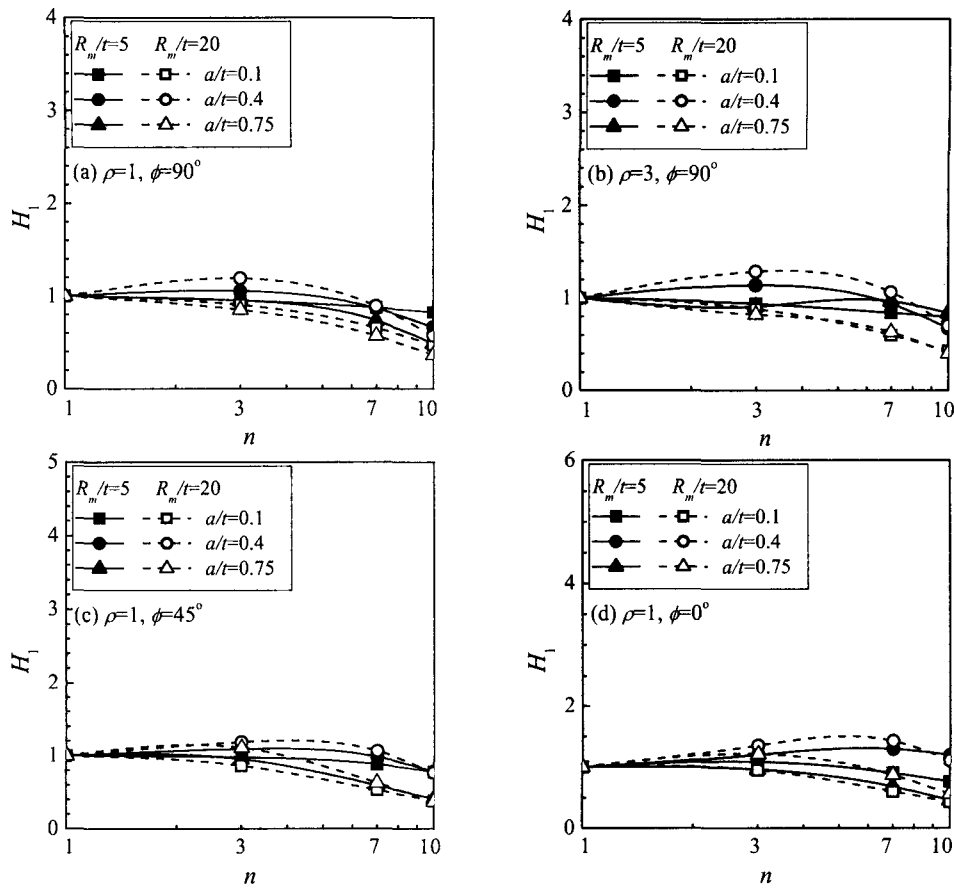


Fig. 3 Variations of H_I values with n for various values of R_m/t and a/t : (a) $\rho=0.5, \phi=90^\circ$, (b) $\rho=1, \phi=90^\circ$, (c) $\rho=2, \phi=45^\circ$ and (d) $\rho=3, \phi=0^\circ$

참조 응력 σ_{ref} 과 참조 변형률 ϵ_{ref} 을 도입하여 식 (8)과 식 (9)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \frac{E\epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_o R} \sigma_y \quad (10)$$

여기서 σ_y 는 0.2% 항복응력이며, ϵ_{ref} 은 $\sigma=\sigma_{ref}$ 일 때 응력-변형률 선도에서 얻어지는 진변형률(true strain)이다. 식 (10)은 근사화된 것으로 정확성은 다소 낮아질 수 있다. 그러나 이 방법은 일반재료 거동에 대해 적용할 수 있을 뿐만 아니라 매우 단순하다. 식 (10)은 소성 J-적분식을 나타내며 전체 J-적분은 소성역 보정을 포함한 탄성 성분을 추가하여 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E\epsilon_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_o R} \sigma_y \quad (11)$$

본 연구에서는 참조응력에 기초한 이러한 방법을 개선된 참조응력법(enhanced reference stress method; ERSM)이라 정의하였다.

3. 유한요소해석을 통한 검증

본 연구에서 제시한 J-적분 예측식의 타당성을 입증하기 위해 다양한 검증을 수행하였다. 이를 위해 먼저 TP304 스테인리스강에 대한 실제 응력-변형률 데이터⁽¹⁰⁾를 이용하여 3 차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 예측결과와 비교하였다. J-적분에 영향을 미치는 인자 중 균열 깊이(a/t)는 0.2, 0.5, 균열길이 (ρ)는 0.5, 3 로 변화시

켰다. 또한 실린더 반경(R_m/t)은 5, 20 으로 변화시켜 총 8 가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였다. 유한요소모델은 Fig. 4 와 같이 대칭성을 고려하여 1/4 만을 모델링하였으며 20 절점 등사각주요소(20-node isoparametric quadratic brick element; C3D20R)를 사용하여 1,800 개의 요소(element)와 8,817 개의 절점(node)으로 구성하였다. 내압 작용시, 배관 끝단에 압력에 해당하는 인장하중을 가하였으며, 균열면 압력 효과를 고려하였다.

J-적분은 ABAQUS 에서 제공하는 영역적분법을 이용하여 유한요소해석결과로부터 계산하였다. 계산된 J-적분은 경로 독립성이 잘 유지되었으며, 2~5 번째 경로에 대한 평균값으로부터 결정하였다.

Fig. 5, 6 은 각각 $R_m/t=5, 20$ 인 경우에 대해 유한요소해석결과와 ERSM 결과를 비교한 것이다. 그림에서 J-적분은 σ_y 와 c 로 무차원화하였으며, 작용하중은 최적참조압력 p_{or} 로 무차원화하였다. 고압의 경우 소성붕괴로 인해 J-적분은 유효성을 상실하기 때문에 $p/p_{or}=1.5$ 까지 나타내었다. Fig. 5, 6 에 나타낸 바와 같이 유한요소해석결과와 예측결과는 대부분 잘 일치하였다. 특히 균열각 위치에 대해 동일한 최적참조하중을 사용함에도 불구하고, 각 균열각($\phi=90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$)에 대한 예측결과는 유한요소해석결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 J-적분 예측식은 식 (11)과 같이 매우 간단함에도 불구하고 균열각 임의의 위치에 대한 J-적분을 매우 정확히 예측할 수 있다. Fig. 5, 6 에서 깊고 긴 균열인 $a/t=0.5, \rho=3$ 인 경우, 부정확한 예측결과를 나타낸다. 그러나 이러한 균열은 매우 극단적인 경우로 실제 구조물에서 발생하는 중요한 균열은 아니며, 또한 예측결과가 유한요소해석 결과를 보수적으로 예측하므로 충분히 무시될 수 있다.

4. 토 의

본 연구에서는 내압 하중하에서 축방향 균열이 존재하는 실린더에 대한 공학적 J-적분 예측식을 ERSM 에 기초하여 제시하였다. 제시된 식은 일반 재료에 대한 3 차원 유한요소해석결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

본 연구에서 제시한 방법은 기존의 소성한계하중 대신 최적참조하중을 참조응력으로 정의하였다. 일반적으로 최적참조하중 p_{or} 은 소성한계하중해와 차이가 크지 않다. Fig. 7 은 제시된 p_{or} 해와 기존의 한계하중해를 비교한 것이다. 사용된 소성한계하

중해는 유한요소해석으로부터 얻은 식⁽¹²⁾ (12)과 Battelle 해⁽¹³⁾이다.

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \frac{t}{R_m} \left[1 + A_1 \left(\frac{a}{t} \right) + A_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] \tag{12}$$

$$A_1 = 0.0462 - 0.0569\rho - 0.013\rho^2$$

$$A_2 = 0.0395 - 0.3413\rho + 0.0652\rho^2$$

식 (12)는 3 차원 유한요소해석으로부터 얻은 광범위 항복(global yielding)에 기초한 식이다. Battelle 해는 배관 실험 결과에 기초한 경험식으로 다음과 같다.

$$p_L = \sigma_y \frac{t}{R_m} \left[\frac{(1-a/t)}{1 - \frac{(1-a/t)}{\sqrt{1+1.05\rho^2}}} \right] \tag{13}$$

이 식은 국부 소성 붕괴에 기초한 식이므로 $a/t \rightarrow 1$ 이면 0 을 나타낸다. p_{or} 과 두 한계하중해를 비교하면 얇은 균열에 대해서는 p_{or} 해가 국부 한계하중해와 가까우며 깊은 균열에 대해 광범위 한계하중해와 유사하게 나타난다.

본 연구에서 제시한 식은 내압에 대해 적용할 수 있을 뿐만 아니라 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 존재하는 경우에 대해서도 쉽게 확대 적용할 수 있다. 일반적으로 굽힘 하중은 축방향 표면균

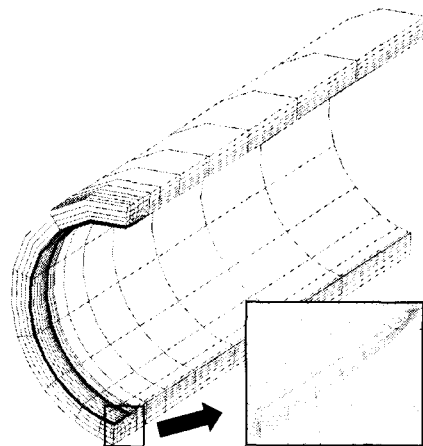


Fig. 4 Typical finite element meshes for cylinders with finite internal axial surface axial cracks: $R_m/t=5, a/t=0.1$ and $\rho=0.5$

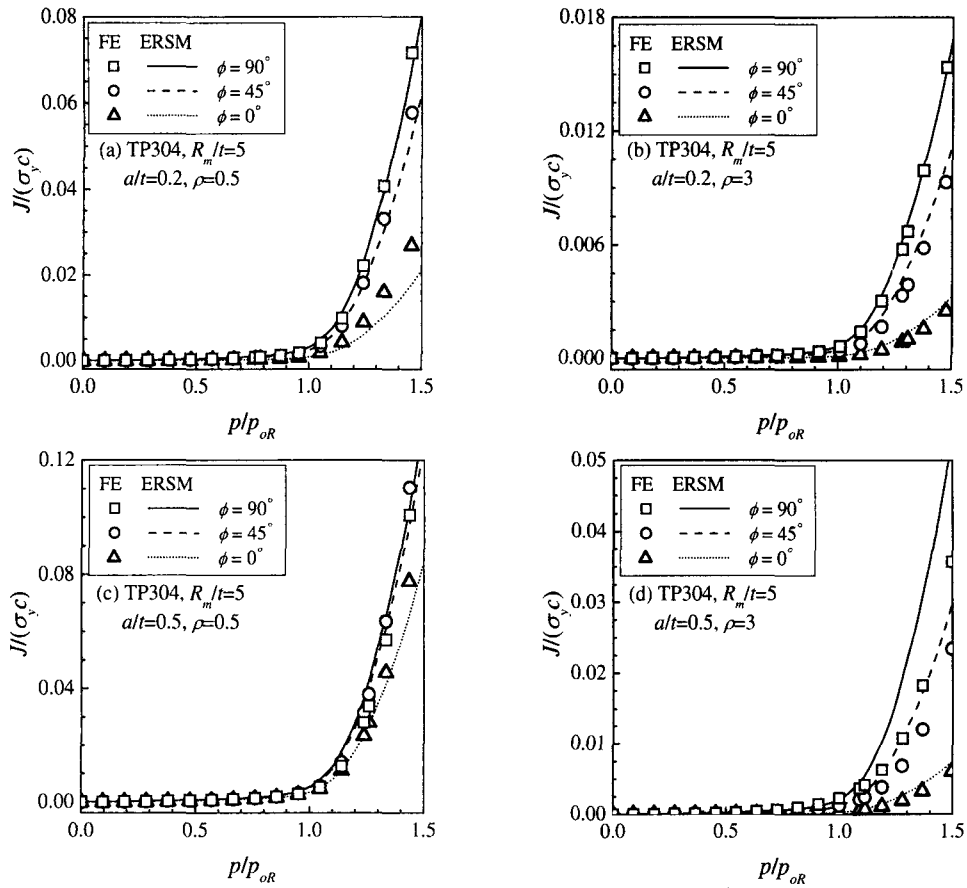


Fig. 5 Comparison of FE J results for cylinders with finite internal axial surface cracks under internal pressure with the proposed enhanced reference stress based J estimations at three different locations along the crack front, $\phi=90^\circ$ (deepest), $\phi=45^\circ$ (mid) and $\phi=0^\circ$ (surface). The cylinder geometry is fixed to $R_m/t=5$

열이 존재하는 실린더의 소성 한계하중에 매우 적은 영향을 미친다.⁽¹⁴⁾ 본 연구에서 제시한 ERSM은 Fig. 3 과 같이 소성 한계하중과 유사하므로 본 연구에서 제시한 J -적분 예측식은 내압과 굽힘 하중이 동시에 작용하는 경우에 확대 적용할 수 있다. 이 경우에 대한 검증은 수행하지 않았으나 축방향 관통 균열에 대해 유사한 연구가 수행된 바 있다.⁽¹⁵⁾ 해석결과 예상한 바와 같이 J -적분에 대한 굽힘 모멘트의 영향은 미약하다.

고온 환경하의 균열 실린더에 대한 안전성 평가를 위해서는 크리프 균열 성장에 대한 C^* -적분의 계산이 필수적이다.^(16,17) 이 경우, 일반 크리프 거동을 보이는 재료에 대한 C^* -적분은 본 연구에서 제시한 J -적분 예측식으로부터 다음과 같이 예측될 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$C^* = \left(\frac{E}{E'} \right) \cdot \frac{K^2 \dot{\epsilon}_c}{\sigma_{ref}} \quad (14)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_c$ 는 $\sigma = \sigma_{ref}$ 일 때 실제 크리프 변형률 데이터로부터 얻어지는 크리프 변형률 속도(creep strain rate)이다.

확률론적 파괴역학해석을 수행하기 위해서는 많은 J -적분 및 C^* -적분 계산이 필요하며 따라서 기존 변형소성에 기초한 방법은 적용하기 매우 어렵다. 본 연구에서는 제시한 예측식은 매우 간단하면서도 실제 재료에 대한 J -적분 및 C^* -적분을 정확히 예측⁽¹⁸⁾하므로 확률론적 파괴역학해석에 폭넓게 사용될 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 실린더에 존재하는 축방향 표면 균열에 대한 공학적 J -적분 예측식을 제시하였다. J -적분 예측식은 일반 응력-변형률 선도에 적용할 수 있도록 ERSM 을 도입하여 제시하였다. 이를

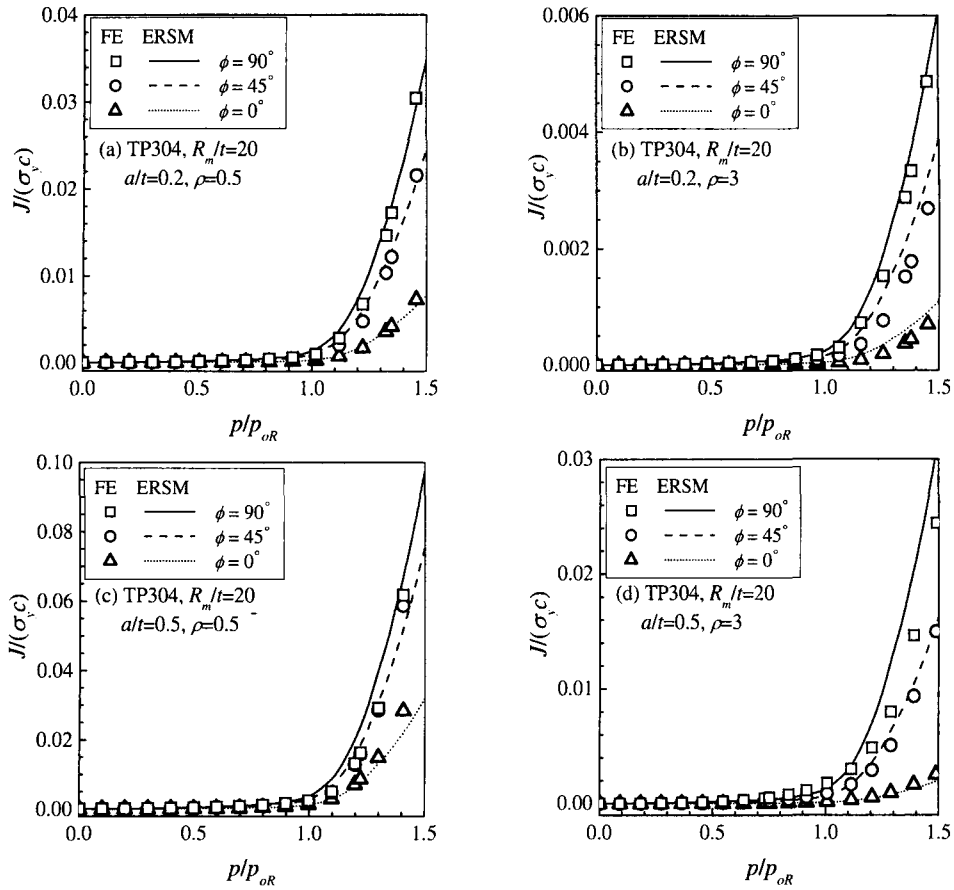


Fig. 6 Comparison of FE J results for cylinders with finite internal axial surface cracks under internal pressure with the proposed enhanced reference stress based J estimations at three different locations along the crack front, $\phi=90^\circ$ (deepest), $\phi=45^\circ$ (mid) and $\phi=0^\circ$ (surface). The cylinder geometry is fixed to $R_m/t=20$

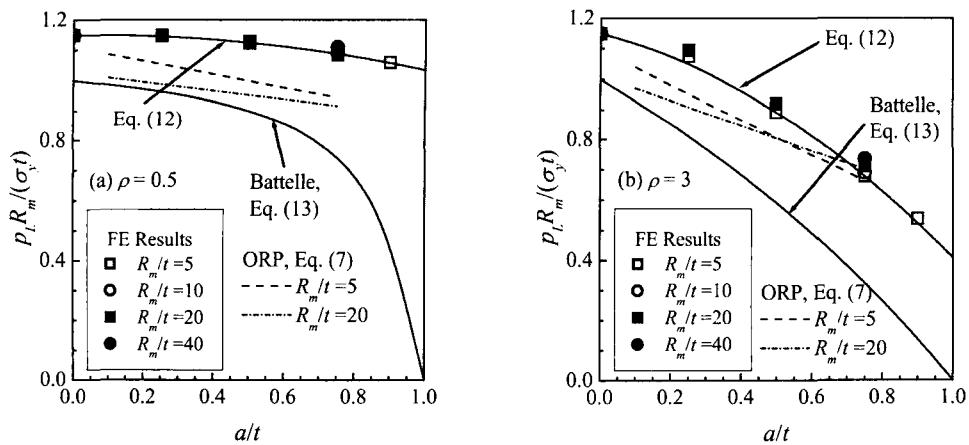


Fig. 7 Comparison of the FE limit pressure solutions for cylinders with finite internal axial surface cracks under internal pressure with the FE solutions in Ref. (13): (a) $\rho=0.5$, (b) $\rho=3$. In the figure, "ORP" denotes optimised reference pressure

위해 Part I 에서 수행된 유한요소해석결과를 재정리하여 최적참조하중을 정의하였으며, 최적참조하중으로부터 J-적분 예측식을 새롭게 제시하였다. 제시된 J-적분 예측식은 균열선단 임의의 위치에 서뿐만 아니라 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대해 확대 적용할 수 있다. 제시한 식의 타당성을 입증하기 위하여 TP304 스테인리스 강에 대한 실제 응력-변형률 선도를 사용한 3차원 유한요소해석결과와 비교하였다. J-적분 예측결과와 유한요소해석결과는 잘 일치하였으며, 이를 통해 제시된 식의 타당성을 입증하였다. 본 연구에서 제시한 식은 균열선단 임의의 위치에 대해 J-적분 및 C^{*}-적분을 예측할 수 있으며, 매우 간단하므로 확률론적 파괴역학해석에 쉽게 적용할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

(1) Kim, J.S., Kim, Y.J., Park, Y.J. and Kim, Y.J., 2002. "Engineering J-Integral Estimation for Internal Axial Surface Cracks in Cylinder (I)-Deformation Plasticity Based Estimation-," Transactions of the KSME, A, Vol. 26, No. 8, pp. 1672~1679.

(2) Kumar, V. and German, M.D., 1988, *Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders*, EPRI Report, NP-5596.

(3) Zahoor, A., 1991, *Ductile Fracture Handbook*, Vol. 2 Chapter 6 Axial Through-Wall Crack, Novetech Corp.

(4) Rahman, S., Brust, F., Ghadiali, N., Choi, Y.H., Krishnaswamy, P., Moberg, F., Brickstad, B. and Wilkowski, G., 1995, "Refinement and Evaluation of Crack Opening Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes," NUREG report NUREG/CR-6300, Battelle, OH.

(5) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "Enhanced Reference Stress Based J and COD Estimation Method for LBB Analysis and Comparison with GE/EPRI Method," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 24, pp.

243~254.

(6) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.

(7) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2002, "Pressure Induced Hoop Stress Effect on Fracture Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes," *Engineering Fracture Mechanics* (to appear).

(8) R6, 2000, *R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 3*, British Energy Generation Ltd.

(9) Kim, J.S, Kim, Y.J. and Kim Y.J., 2002, "Fracture Behavior Estimation for Circumferential Surface Cracked Pipes (I) -J-Integral Estimation Solution -," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 1, pp. 131~138.

(10) Kim, Y.J., Seok, C.S., Jun, H.K., Choi, Y.H. and Lee, J.B., 1996, "Development of Nuclear Piping Integrity Expert System (I) -Evaluation Method Recommendation and Material Properties Inference-," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 20, No. 8, pp. 575~584.

(11) ABAQUS, 1999, *ABAQUS Standard/User's Manual*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, RI.

(12) Kim, Y.J., Shim, D.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "Plastic Limit Pressure for Cracked Cylinders Using Finite Element Limit Analyses," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (to appear).

(13) Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J. and Duffy, A.R., 1973, "Failure Stress Levels of Flaws in Pressurised Cylinders," in *Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing*, ASTM STP 536, pp. 461~81.

(14) Miller, A.G., "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.

(15) Kim, Y.J., Huh, N.S., Part, Y.J. and Kim, Y.J., 2001, "Elastic-Plastic J and COD Estimations for Axial Through-Wall Cracked Pipes," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (to appear).

(16) Webster, G.A. and Ainsworth, R.A., 1994, *High Temperature Component Life Assessment*, Chapman & Hall.

(17) R5, 1998, *R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2*, British Energy Generation Ltd.

(18) Kim, J.S, Kim, Y.J. and Kim Y.J., 2002, "Estimation of C^{*}-Integral for Defective Components with General Creep Deformation Behaviors," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 5, pp. 795~802.