

축방향 관통균열 배관의 새로운 탄소성 J -적분 및 COD 계산식

허남수* · 박영재* · 김윤재* · 김영진†

(2002년 2월 7일 접수, 2002년 12월 31일 심사완료)

New Engineering J and COD Estimation Methods for Axial Through-Wall Cracked Pipes

Nam-Su Huh, Young-Jae Park, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

Key Words : Axial Through-Wall Crack(축방향 관통균열), Crack Opening Displacement(균열열림변위), J -integral(J -적분), Leak-Before-Break(과단전누설), Reference Stress(참조응력)

Abstract

This paper proposes engineering estimation equations of elastic-plastic J and COD for axial through-wall cracked pipes under internal pressure. Based on detailed 3-D FE results based on deformation plasticity, the plastic influence functions for fully plastic J and COD solutions are tabulated as a function of the mean radius-to-thickness ratio, the normalized crack length, and the strain hardening. Based on these results, the GE/EPRI-type J and COD estimation equations are proposed and validated against the 3-D FE results based on deformation plasticity. For more general application to general stress-strain laws or to complex loading, the developed GE/EPRI-type solutions are re-formulated based on the reference stress concept. Such a re-formulation provides simpler equations for J and COD, which are then further extended to combined internal pressure and bending. The proposed reference stress based J and COD estimation equations are compared with elastic-plastic 3-D FE results using actual stress-strain data for Type 316 stainless steels. The FE results for both internal pressure cases and combined internal pressure and bending cases compare very well with the proposed J and COD estimations.

1. 서론

탄소성 파괴역학(Elastic-Plastic Fracture Mechanics; EPFM)에 입각한 배관의 건전성 평가는 다양한 배관의 형상(직관, 곡관, 분지관, 노즐 등), 하중 조건(내압, 인장하중, 굽힘 모멘트, 2차 하중 등), 그리고 균열 형상으로 인해 제대로 정립되지 못한 분야가 많으며 현재에도 많은 연구가 진행 중이다. 특히 1980년대 중반부터 대두된 원자력 배관의 과단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 설계를 위해 원주방향 균열(circumferential crack)에 대해서는 많은 연구⁽¹⁻³⁾가 수행되었으나 축방향 균열(axial crack)에 대한 연구는 미약한 실정이다. 가동중검사시 발견된 축방향 균열의 건전성평가를 위한 한계하중법

기반의 평가법⁽⁴⁾이 제시되어 있으나 LBB 해석시 필요한 EPFM 매개변수인 J -적분과 균열열림변위(Crack Opening Displacement; COD)의 경우, 원주방향 관통균열에 대해서만 많은 공학적 계산식⁽⁵⁻⁸⁾이 제시되어 있을 뿐 축방향 관통균열에 대해서는 거의 제시되어 있지 않다.

Zahoor⁽⁹⁾은 내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관의 J -적분과 COD 계산식을 각각 Dugdale 모델과 소규모항복(small scale yielding) 모델을 이용하여 제시하였으나 적용 하중 범위에 따라 해의 정확성이 틀려지므로 사용이 제한적이다. 일반적으로 축방향 균열이 원주방향 균열에 비해 위험성이 낮지만 내압의 영향이 지배적이거나 고온 배관의 건전성 평가를 위해서는 축방향 균열에 대한 정확한 비선형 파괴역학 해석법이 제시되어야 한다.

본 논문의 목적은 내압 또는 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 축방향 관통균열 배관의 정확한 비선형 파괴역학 해석을 위한 J -적분 및

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

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

Table 1 Summary of FE calculations for the present work

Loading condition	R_m/t	ρ	n
Internal pressure with crack face pressure	5, 10, 20	0.5	1, 3, 7
		1.0	1, 3, 7
		2.0	1, 3, 7
		3.0	1, 3, 7

COD 계산식을 제시하는 것이다. 이를 위해 먼저 내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관에 대한 제한된 3차원 유한요소해석을 수행하여 변형소성이론(deformation plasticity theory)에 입각한 GE/EPRI 법 기반의 J -적분과 COD의 소성성분 계산식을 결정하였으며, 해석 결과를 재정리하여 참조응력(reference stress) 개념을 기반으로 한 계산식도 새롭게 제시하였다. 또한 실제 응력-변형률 곡선을 사용한 3차원 유한요소해석을 수행하여 제시된 계산식의 타당성을 검증하였다.

2. GE/EPRI법을 기반으로 한 J -적분 및 COD 계산식

2.1 유한요소해석

Fig. 1은 내압(p)이 작용하는 축방향 관통균열 배관의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 여기서 R_m 과 t 는 각각 평균반경과 두께이며, c 는 균열 길이의 1/2이다. 이때 축방향 균열에 대한 무차원 균열 길이비(ρ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{R_m t}} \quad (1)$$

변형소성이론에 입각한 GE/EPRI법을 기반으로 공학적 계산식을 제시하기 위해서는 재료의 응력-변형률 관계를 다음과 같은 Ramberg-Osgood(R-O) 관계로 이상화하여야 한다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (2)$$

여기서, α 와 n 은 각각 R-O 상수와 가공경화지수이며, σ_y 는 재료의 항복강도이다. 또한 ϵ_0 는 σ_y/E 이다.

GE/EPRI법의 탄성 및 소성영향함수를 구하기 위해 유한요소해석에 사용된 배관의 R_m/t 값은 5, 10, 20이며, ρ 는 0.5, 1.0, 2.0 그리고 3.0의 4가지 경우를 고려하였다. 또한 R-O 상수인 α 는 1, σ_y 는 400MPa로 고정하였으며, 가공경화지수는 1, 3, 7의 세가지로 변화시켜 전체 36가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 여기서 n 이 1인 경우는 탄성인 경우에 해당한다. Table 1에 해석 조건을 정리하여 나타내었다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램⁽¹⁰⁾을 이용하여 수행하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 대표적인 유한요소 모델을 나타낸 것으로 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였으며, 20절점 등계수 사각주요

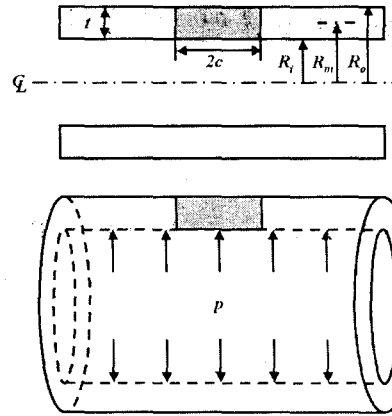


Fig. 1 Schematic illustration for axial through-wall cracked pipes under internal pressure p

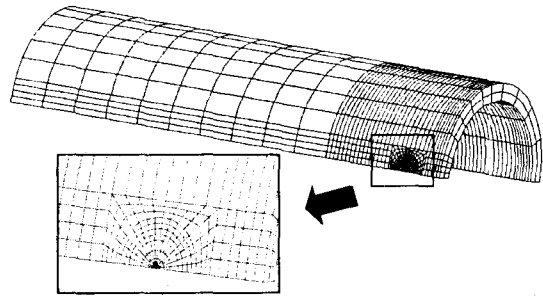


Fig. 2 Typical finite element meshes for axial through-wall cracked pipes

소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였다. 배관 모델에 사용된 요소의 수는 1440개이며, 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 적용하였다. 내압은 배관 내부에 분포 하중의 형태로 작용시켰으며, 배관의 끝단에는 상당 인장하중을 작용시켰다. 또한 균열면에도 내압의 50%에 해당하는 압력을 작용시켰다.

2.2 해석 결과

내압이 작용하는 경우, J -적분의 탄성 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$J_e = \frac{K^2}{E} = \frac{1}{E} (\sigma^\infty \sqrt{\pi c F})^2 ; \sigma^\infty = \frac{p R_i}{2t} \quad (3)$$

여기서, R_i 는 배관의 내반경이며, F 는 응력확대계수 계산을 위한 GE/EPRI법의 형상함수이다. 탄성 유한요소해석 결과($n=1$ 인 경우)를 식 (3)에 대입하면 F 값을 구할 수 있으며 계산된 값을 Table 2에 정리하여 나타내었다. Fig. 3(a)에는 본 논문에서 제시한 축방향 관통균열 배관의 F 값($R_m/t=20$ 인 경우)을 기존 Zahoor해⁽⁹⁾와 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 본 논문에서 새롭게 제시한 값은 기존의 결과와도 잘 일치하였다.

Table 2 Resulting values of F and h_1 -function

R_m/t	ρ	F	$h_1(n=1)$	$h_1(n=3)$	$h_1(n=7)$
5	0.5	2.743	3.859	5.656	6.710
	1.0	3.604	3.740	4.730	4.367
	2.0	5.576	3.409	3.578	2.866
	3.0	7.465	3.055	2.851	2.270
10	0.5	2.608	3.886	5.767	6.903
	1.0	3.428	3.770	4.819	4.519
	2.0	5.350	3.497	3.847	3.311
	3.0	7.229	3.192	3.232	2.914
20	0.5	2.545	3.897	5.806	6.901
	1.0	3.344	3.779	4.927	4.648
	2.0	5.240	3.533	4.012	3.606
	3.0	7.113	3.255	3.430	3.324

Table 3 Resulting values of V and h_2 -function

R_m/t	ρ	V	$h_2(n=1)$	$h_2(n=3)$	$h_2(n=7)$
5	0.5	2.632	4.460	5.617	6.388
	1.0	3.922	4.980	5.824	5.460
	2.0	8.582	6.723	7.223	6.334
	3.0	15.417	8.540	8.606	7.656
10	0.5	2.509	4.487	5.683	6.468
	1.0	3.722	4.989	5.853	5.560
	2.0	8.255	6.826	7.648	7.206
	3.0	15.082	8.818	9.589	9.606
20	0.5	2.452	4.500	5.695	6.407
	1.0	3.627	4.989	5.946	5.611
	2.0	8.093	6.868	7.915	7.649
	3.0	14.913	8.949	10.100	10.744

COD의 탄성 성분도 J -적분의 경우와 동일하게 다음과 같이 표현된다.

$$\delta_e = \frac{4}{E} \sigma^\infty c \cdot V; \sigma^\infty = \frac{pR_t}{2t} \quad (4)$$

여기서, V 는 COD의 탄성 성분을 계산하기 위한 형상함수로 탄성 유한요소해석 결과를 식 (4)에 대입하여 구한다. 계산된 V 값을 Table 3에 정리하여 나타내었다. Fig. 3(b)에는 본 논문에서 제시한 축방향 관통균열 배관의 V 값($R_m/t=20$ 인 경우)을 기존 Zahoor해,⁽⁹⁾ 그리고 AEAT해⁽¹¹⁾와 비교하여 나타내었다. 이 경우 3차원 유한요소해석을 기반으로 제시된 AEAT해와 본 논문의 결과가 잘 일치하여 본 연구에서 사용한 해석 방법의 타당성이 잘 입증되었다. 그러나 Zahoor해를 이용한 경우는 본 논문의 결과보다 작게 나타났으며, 따라서 Zahoor해를 사용하면 COD를 작게 계산하게 된다.

내압이 작용하는 경우에 대한 J -적분의 소성 성분(J_p)과 COD의 소성 성분(δ_p) 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$J_p = \alpha \sigma_y \varepsilon_o c h_1 \left(n \left(\frac{p}{p_L} \right) \right)^{n+1} \quad (5)$$

$$\delta_p = \alpha \varepsilon_o c h_2 \left(n \left(\frac{p}{p_L} \right) \right)^n \quad (6)$$

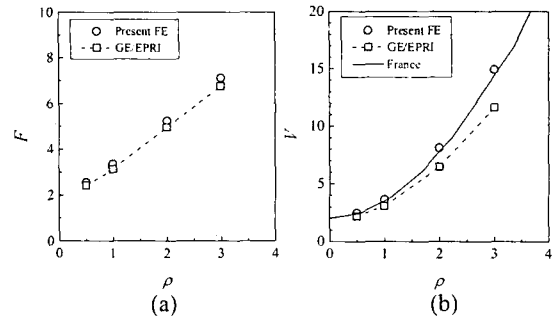


Fig. 3 Variations of the shape factors for (a) the stress intensity factor and (b) the elastic COD with ρ . The present solutions are compared with Ref. (9) and Ref. (11) ($R_m/t=20$)

여기서, p_L 은 축방향 관통균열 배관의 소성한계압력(plastic limit pressure)으로 다음과 같이 표현된다.⁽¹²⁾

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \left(\frac{t}{R_m} \right) \frac{1}{\sqrt{1 + 0.34\rho + 1.34\rho^2}} \quad (7)$$

식 (5)와 식 (6)에서 소성영향함수인 h_1 과 h_2 는 배관의 형상(R_m/t), 균열길이(ρ), 그리고 가공경화지수(n)의 함수로 유한요소해석 결과를 이용하여 다음과 같이 구한다. 먼저 J -적분과 COD의 소성 성분은 유한요소해석으로 구한 전체 J -적분과 COD에서 탄성 성분을 제외하여 다음과 같이 구한다.

$$J_p^{FE} = J^{FE} - \frac{1}{E} \left(\frac{pR_t}{2t} \right)^2 \pi c \cdot F^2 \quad (8)$$

$$\delta_p^{FE} = \delta^{FE} - \frac{4}{E} \left(\frac{pR_t}{2t} \right) c \cdot V \quad (9)$$

여기서, J^{FE} 와 δ^{FE} 는 각각 유한요소해석으로 구한 전체 J -적분과 COD를 의미하며, J_p^{FE} 와 δ_p^{FE} 는 유한요소해석으로 구한 J -적분과 COD의 소성 성분을 의미한다.

따라서 식 (8)과 식 (9)에서 구한 결과를 식 (5)와 식 (6)으로 정리하면 축방향 관통균열 배관의 소성영향함수를 구할 수 있다. 소성영향함수는 작용 하중의 크기에 따라 변하므로 소성영향함수가 특정 값으로 수렴하는 범위까지 해석을 수행하여 더 이상 하중의 크기에 영향을 받지 않는 구간에서의 값을 소성영향함수로 정의하였다. 이와 같이 구한 소성영향함수 h_1 과 h_2 값을 각각 Table 2와 Table 3에 정리하여 나타내었다.

2.3 GE/EPRI법을 이용한 J -적분과 COD 계산

식 (3)~식 (7)을 이용하면 변형소성이론에 입각한 GE/EPRI법으로 축방향 관통균열 배관의 J -적분과 COD를 구할 수 있으며, J -적분은 다음과 같이 구한다.

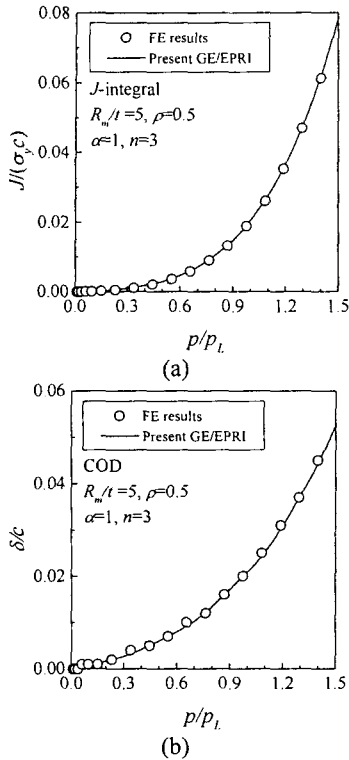


Fig. 4 Comparison of FE J and COD results with the GE/EPRI estimations. Note that the FE results are based on the Ramberg-Osgood materials with deformation plasticity option

$$J = \frac{1}{E} \left\{ \frac{pR_L}{2t} \sqrt{\pi c_e} F(c_e) \right\}^2 + \alpha \sigma_y \varepsilon_o c h_1(n) \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n+1} \quad (10)$$

여기서, c_e 는 소성역 보정을 위한 유효균열길이 (effective crack length)로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c_e = c + \varphi r_y; \varphi = \frac{1}{1 + (p/p_L)^2}; r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (11)$$

마찬가지로 COD는 다음과 같이 구한다.

$$\delta = \frac{4}{E} \left(\frac{pR_L}{2t} \right) c_e V(c_e) + \alpha \varepsilon_o c h_2(n) \left(\frac{p}{p_L} \right)^n \quad (12)$$

위 식에서 소성영향함수인 h_1 과 h_2 는 Table 2와 Table 3의 결과를 내삽(interpolation) 또는 외삽(extrapolation)하여 구할 수 있다.

Fig. 4는 이상화된 R-O 재료에 대해 변형소성이론으로 구한 유한요소해석 결과를 본 논문에서 제시한 GE/EPRI법으로 구한 값과 비교한 대표적인 결과이다. 해석시 사용된 배관의 형상 및 R-O 상수는 그림에 함께 나타내었다. J -적분은 항복강도와 균열길이를 무차원화 하여 나타냈으며, 하중은 소성한계압력으로 무차원화 하였다. 또한 COD도 균열길이를 무차원화 하여 나타내었다. 그림에 나

타낸 바와 같이 유한요소해석으로 구한 J -적분과 COD는 본 논문에서 제시한 GE/EPRI법으로 구한 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 GE/EPRI법의 정확성이 입증되었다.

그러나 GE/EPRI법은 재료의 응력-변형을 곡선을 식 (2)와 같은 R-O 관계식으로 이상화하여야 하며 이로 인해 계산 결과가 부정확해진다는 문제점이 있다. 뿐만 아니라 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우 등에 대한 해를 구하기 위해서는 작용하중비, 배관과 균열의 크기, 재료 물성치 등을 고려하여 많은 유한요소해석을 재수행해야 한다는 문제도 있다. 따라서 본 논문에서는 제한된 유한요소해석으로 구한 GE/EPRI법의 소성영향함수를 재정리하여 참조응력 개념을 기반으로 한 새로운 J -적분 및 COD 계산식을 제시하였다.

3. 참조응력 개념을 기반으로 한 J -적분 및 COD 계산식

3.1 J -적분 및 COD 계산식

식 (3)과 식 (4)의 탄성 J -적분과 COD 계산식을 식 (5)와 식 (6)의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$J_e = \alpha \sigma_y \varepsilon_o c h_1(n=1) \left(\frac{p}{p_L} \right)^2 \quad (13)$$

$$\delta_e = \alpha \varepsilon_o c h_2(n=1) \left(\frac{p}{p_L} \right) \quad (14)$$

여기서, $h_1(n=1)$ 과 $h_2(n=1)$ 은 탄성인 경우의 h_1 과 h_2 를 의미한다.

식 (13)과 식 (14)를 이용하여 식 (5)와 식 (6)을 무차원화하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n-1} \quad (15)$$

$$\frac{\delta_p}{\delta_e} = \alpha \frac{h_2(n)}{h_2(n=1)} \left(\frac{p}{p_L} \right)^{n-1} \quad (16)$$

여기서, 가공경화지수의 변화에 따른 $h_1(n)/h_1(n=1)$ 과 $h_2(n)/h_2(n=1)$ 값의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 $h_1(n)/h_1(n=1)$ 과 $h_2(n)/h_2(n=1)$ 은 가공경화지수가 1~7로 변화함에 따라 0.7~1.8 정도까지 변하여 가공경화지수에 민감하였다.

임의의 기준 압력인 p_{ref} 를 도입하여 식 (15)와 식 (16)을 재정리하면 다음과 같다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \left\{ \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \left(\frac{p_{ref}}{p_L} \right)^{n-1} \right\} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{n-1} \quad (17)$$

$$\frac{\delta_p}{\delta_e} = \alpha \left\{ \frac{h_2(n)}{h_2(n=1)} \left(\frac{p_{ref}}{p_L} \right)^{n-1} \right\} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{n-1} \quad (18)$$

여기서, $h_1(n)/h_1(n=1)$, $h_2(n)/h_2(n=1)$ 와 p_{ref}/p_L 은 무차원

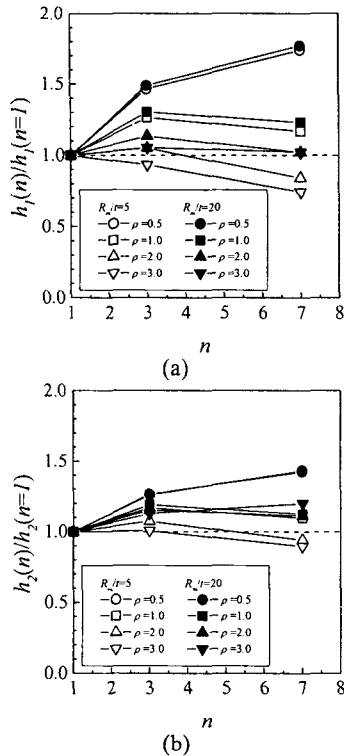


Fig. 5 Variations of (a) $h_1(n)/h_1(n=1)$ and (b) $h_2(n)/h_2(n=1)$ with n for $R_m/t=5$ and 20

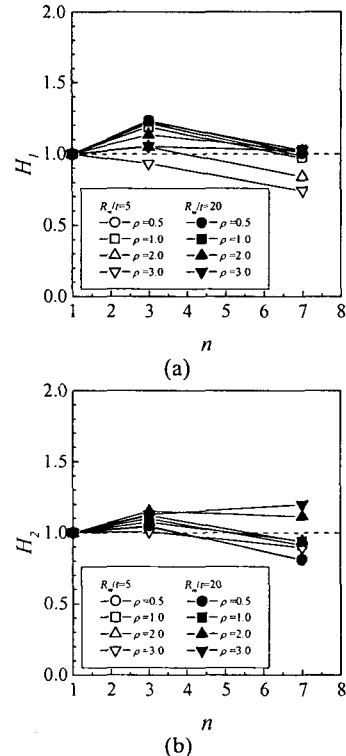


Fig. 6 Variations of (a) H_1 and (b) H_2 with n for $R_m/t=5$ and 20

상수이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha H_1 \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{n-1} \quad (19)$$

$$\frac{\delta_p}{\delta_e} = \alpha H_2 \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{n-1} \quad (20)$$

여기서, 무차원 상수인 H_1 과 H_2 는 가공경화지수에 의존하는 함수이다.

Ainsworth⁽¹³⁾가 제시한 참조응력 개념에 기초한 J-적분 및 COD 계산식의 기본 개념은 H_1 과 H_2 의 가공경화지수 의존성을 줄일 수 있도록 참조하중 (p_{ref})을 정의하는 것이다. Ainsworth는 현장 적용성을 고려하여 소성한계하중(plastic limit load)을 참조하중으로 제시하여 R6 평가법⁽¹⁴⁾ 등에 적용되고 있으나, 이는 H_1 과 H_2 의 가공경화지수 의존성을 최소화하지 못하여 계산 결과가 일반적으로 부정확하다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 2절에서 제시한 GE/EPRI 법의 소성영향함수를 다음의 관계로 재정리하여 내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관의 새로운 참조하중인 최적참조압력(p_{oR})식을 제시하였다.

$$p_{ref} = p_{oR} = \left\{ \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \right\}^{1/(1-n)} p_L \quad (21)$$

식 (21)의 관계를 이용하여 구한 최적참조압력 식은 다음과 같다.

$$p_{ref} = p_{oR} = \psi(\rho) \cdot p_L \quad (22)$$

$$\psi(\rho) = \begin{cases} -0.06\rho^2 + 0.21\rho + 0.82 & \text{for } \rho < 1.5 \\ 1 & \text{for } \rho \geq 1.5 \end{cases} \quad (23)$$

여기서, p_L 은 식 (7)을 이용하여 구한다.

식 (22)의 p_{oR} 을 식 (17)과 식 (18)에 대입하여 가공경화지수에 따른 H_1 과 H_2 함수의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에서 $h_1(n)/h_1(n=1)$ 과 $h_2(n)/h_2(n=1)$ 는 가공경화지수가 1~7로 변화함에 따라 0.7~1.8정도까지 변화했으나 H_1 과 H_2 는 0.8~1.2까지 변화하여 본 논문에서 새롭게 제시한 최적참조압력에 의해 소성영향함수의 가공경화지수 의존성이 최소화됨을 알 수 있다. 이와 같이 새롭게 제시된 최적참조압력에 의해 근사적으로 $H_1 \approx 1$, $H_2 \approx 1$ 의 관계가 성립되므로 식 (19)와 식 (20)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} \approx \alpha \left(\frac{p}{p_{oR}} \right)^{n-1} \quad (24)$$

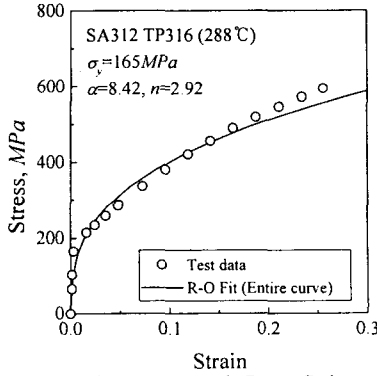


Fig. 7 Stress-strain curve and R-O fitting result for SA312 TP316 steel (288°C)

$$\frac{\delta_p}{\delta_e} \approx \alpha \left(\frac{p}{p_{oR}} \right)^{n-1} \quad (25)$$

또한 소성 변형률은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_p = \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1} \quad (26)$$

따라서 식 (26)의 관계를 이용하면 식 (24)와 식 (25)를 다음과 같이 참조응력(σ_{ref})과 참조변형률(ϵ_{ref})의 관계로 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} \approx \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_{oR}} \sigma_y \quad (27)$$

$$\frac{\delta_p}{\delta_e} \approx \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{p}{p_{oR}} \sigma_y \quad (28)$$

여기서, ϵ_{ref} 는 참조응력(σ_{ref})에서 정의되는 참조변형률로 실제 진응력-진변형률 곡선에서 구한다.

식 (27)과 식 (28)에 소성역 보정항^(7,14)을 더하면 참조응력 개념을 기반으로 한 전체 J -적분과 COD 계산식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E \epsilon_{ref}} \quad (29)$$

$$\frac{\delta}{\delta_e} = \begin{cases} \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E \epsilon_{ref}} & \text{for } 0 \leq \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \leq 1 \\ \left(\frac{\delta}{\delta_e} \right)_{\sigma_{ref}=1} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^{n-1} & \text{for } 1 < \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \end{cases} \quad (30)$$

식 (30)에서 재료의 가공경화지수는 다음의 식으로 구한다.⁽⁷⁾

$$n_1 = \frac{\ln\{(\epsilon_{u,t} - \sigma_{u,t}/E)/0.002\}}{\ln(\sigma_{u,t}/\sigma_y)} \quad (31)$$

여기서, $\sigma_{u,t}$ 와 $\epsilon_{u,t}$ 는 진 인장강도(true tensile strength)와 그때의 변형률을 의미한다. 식 (31)은 0.2% 순수 소성응력과 인장강도 사이의 응력-변형률 곡선

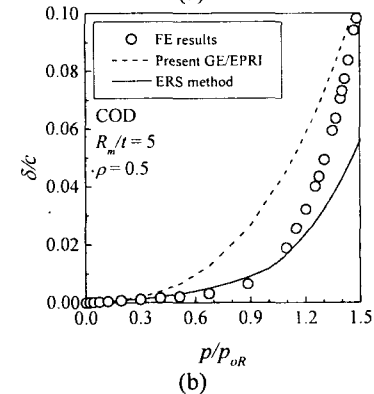
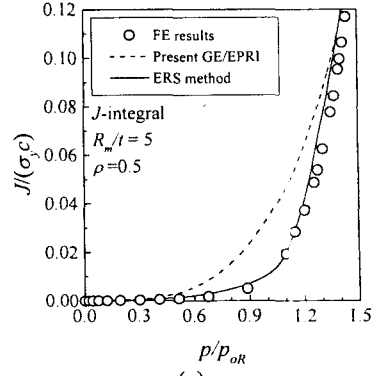


Fig. 8 Comparison of J and COD for axial through-wall cracked pipes under internal pressure ($\rho=0.5$)

을 멱승법(power-law method)으로 곡선 적합한 것이다.⁽⁷⁾

3.2 유한요소해석을 이용한 수치해석적 검증
새롭게 제시된 참조응력 개념 기반의 J -적분 및 COD 계산식의 타당성을 검증하기 위해서 실제 응력-변형률 곡선을 사용한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 배관의 R_m/t 값은 5와 20이며, 균열길이는 $\rho=0.5$ 와 2.0의 두 가지 경우를 고려하였다. 재료는 SA312 TP316 스테인리스강 (288°C)으로 항복강도와 인장강도는 각각 165MPa, 455MPa이며 실제 응력-변형률 곡선을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 $R_m/t=5$ 이고 $\rho=0.5$ 와 2.0인 경우에 대한 J -적분 및 COD 계산 결과를 나타낸 것이다. 3차원 유한요소해석으로 구한 결과와 본 논문에서 새롭게 제시한 축방향 관통균열 배관에 대한 GE/EPRI법으로 구한 결과(Present GE/EPRI), 그리고 최적참조압력을 이용한 참조응력 개념 기반의 계산식(Enhanced Reference Stress: ERS)으로 구한 계산 결과(ERS method)를 비교하여 나타내었다. 하중은 최적참조압력(식 (22))으로 무차원화하여 나타내었으며 J -적분은 항복강도와 균열길이로 무차원화하여 나타내었다. 또한 COD도 균열길이로

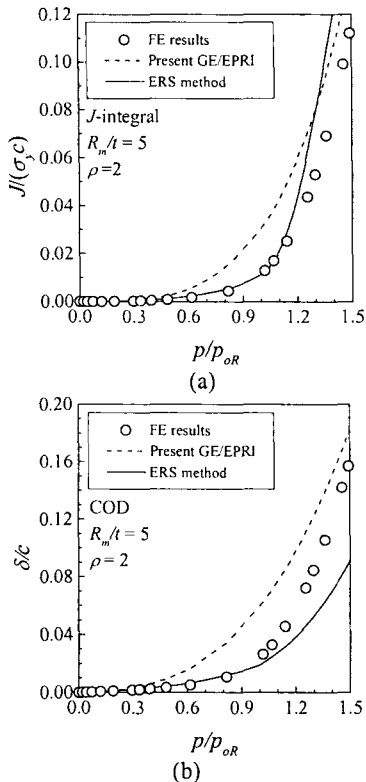


Fig. 9 Comparison of J and COD for axial through-wall cracked pipes under internal pressure ($\rho=2.0$)

무차원화하여 나타내었다. GE/EPRi법으로 계산할 때에는 재료의 R-O 상수로 Fig. 7에 나타낸 바와 같은 전체 응력-변형을 범위에 대한 곡선 적합으로 구한 α 와 n 값을 사용하였다.

해석 결과 두 경우 모두 본 논문에서 새롭게 제시한 최적참조압력식 기반의 ERS법으로 예측한 J -적분은 하중범위에 관계없이 실제 응력-변형을 곡선을 사용한 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 그러나 GE/EPRi법으로 구한 결과는 유한요소해석 결과와 차이를 보였다. 이와 같은 차이는 응력-변형을 곡선에 대한 R-O 이상화에서 기인하는 것으로 GE/EPRi법은 R-O 이상화 결과에 따라 계산 결과가 변한다는 문제점이 있다. 그러나 이미 알려진 바와 같이 R-O 이상화는 재료 특성이나 곡선 적합 방법 및 구간에 따라 정확성이 변하기 때문에 최적의 R-O 이상화 방법은 제시되지 못하고 있다. 반면 ERS법으로 구한 COD 계산 결과는 하중 증가에 따라 유한요소해석 결과보다 작게 계산되었다. 그러나 보수적인 구조물의 건전성 평가나 LBB 해석을 위해서는 COD가 작게 예측되어야 하므로 ERS법을 사용하면 보수적인 평가가 수행될 수 있다. 그러나 GE/EPRi법의 경우는 COD를 비보수적으로 평가하고 있으며 J -적분과 동일하게 COD 계산 결과도 R-O 이상화 결과에 따라 변한다는 문제점이 있다. $R_m/t=20$ 인 경우도 $R_m/t=5$

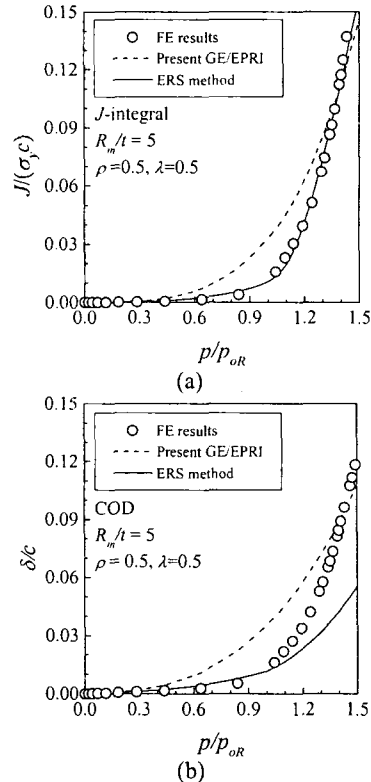


Fig. 10 Comparison of J and COD for axial through-wall cracked pipes under combined internal pressure and bending

인 경우와 동일한 결과를 나타내었다.

4. 토론

본 논문에서는 하중조건으로 내압만을 고려하였으나 일반적으로 배관에는 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용한다. 그러나 축방향 균열의 경우는 굽힘 모멘트가 균열 거동에 미치는 영향이 작으므로 내압에 대한 본 논문의 결과는 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우에도 적용할 수 있다 이를 입증하기 위해 3.2절에서 고려된 형상에 대해 내압과 굽힘 모멘트를 동시에 작용시켜 유한요소해석으로 구한 결과를 내압에 대한 본 논문의 계산식과 비교하였다. 이때 작용하중비(λ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{M}{(\pi R_i^2 p) R_m} \quad (32)$$

유한요소해석은 λ 가 0.5인 경우에 대해 수행하였다. 또한 굽힘 모멘트가 작용하는 경우에는 중립축을 중심으로 응력 구배가 발생하므로 균열 위치는 최대 인장응력이 작용하는 곳으로 가정하였다.

Fig. 10은 대표적인 해석결과로 $R_m/t=5$ 이고 $\rho=0.5$ 인 경우의 결과이다. GE/EPRi법과 ERS법으로 구

한 결과는 Fig. 8과 동일하다. 그림에 나타난 바와 같이 축방향 관통균열 배관의 경우 굽힘 모멘트가 J -적분 및 COD 계산 결과에 미치는 영향은 거의 없으며, 전술한 바와 같이 내압에 대한 본 논문의 계산식을 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우에도 적용할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관의 J -적분과 COD를 정확하게 계산할 수 있는 공학적 계산식을 GE/EPRI법과 참조응력 개념을 기반으로 새롭게 제시하였다. 이를 위해 제한된 유한요소해석을 수행하여 GE/EPRI법의 소성영향함수를 결정하였으며, 계산 결과를 재정리하여 참조응력 개념 기반의 계산식도 새롭게 제시하였다. 또한 제시된 계산식의 타당성을 검증하기 위해 실제 응력-변형률 곡선을 사용한 3차원 유한요소해석을 수행하여 공학적 계산식으로 구한 결과와 비교하였다. 해석 결과 새롭게 제시된 참조응력 개념 기반의 계산식으로 구한 J -적분과 COD는 유한요소해석 결과와 잘 일치하여 타당성이 입증되었다. 뿐만 아니라 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한 유한요소해석 결과와도 잘 일치하여 본 논문에서 제시된 계산식을 내압과 굽힘 모멘트가 동시에 작용하는 경우에도 적용할 수 있음을 입증하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Wilkowski, G.M., Ahmad, J., Barnes, C.R., Broek, D., Kramer, G., Landow, M., Marschall, C.W., Maxey, W., Nakagaki, M., Scott, P., Papaspyropoulos, V., Pasupathi, V. and Popelar, C., 1985, "Degraded Piping Program Phase -II," NUREG/CR-4082, Vol. 1~Vol. 8, USNRC.
- (2) Scott, P., Wilson, M., Olson, R., Marschall, C., Schmidt, R. and Wilkowski, G.M., 1994, "International Piping Integrity Research Program - Final Report," NUREG/CR-6233, Vol. 1~Vol. 4, USNRC.
- (3) Hopper, A., Wilkowski, G.M., Scott, P., Olson, R., Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1997, "The Second International Piping Integrity Research Group Program-Final Report," NUREG/CR-6452, USNRC.
- (4) "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components-ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI," ASME, 1996.
- (5) Kumar, V. and German, M.D., 1988, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," EPRI Report, NP-5596.
- (6) Rahman, S., Brust, F., Ghadiali, N. and Wilkowski, G.M., 1998, "Crack-Opening Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes-Part I : Analytical Models," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 357~373.
- (7) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "New Engineering Estimation Method of J -Integral and COD for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 3, pp. 548~553.
- (8) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2002, "Reference Stress Based Elastic-Plastic Fracture Analysis for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes under Combined Tension and Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 367~388.
- (9) Zahoor, A., 1991, "Ductile Fracture Handbook-Vol. 2 Chapter 6 Axial Through-Wall Crack," Novetech Corp.
- (10) "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., 1999.
- (11) France, C.C., 1997, "Crack Opening Areas and Stress Intensity Factors for Axial and Part-Circumferential Through-Wall Cracks in Cylinders-Summary Report," AEAT-0643, AEA Technology plc.
- (12) Kim, Y.J., Shim, D.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2002, "Plastic Limit Pressures for Cracked Pipes using Finite Element Limit Analyses," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 321~330.
- (13) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (14) "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 3, British Energy Generation Ltd., 1999.