

배관에 존재하는 원주방향 표면균열에 대한 파괴거동 해석 (I)
- J-적분 예측식 -

김진수* · 김윤재* · 김영진†
(2001년 4월 27일 접수, 2001년 10월 18일 심사완료)

Fracture Behavior Estimation for Circumferential Surface Cracked Pipes (I)
- J-Integral Estimation Solution -

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

Key Words : Circumferential Cracked Pipe(원주방향 균열배관), Finite Element Analysis(유한요소해석), J Estimation(J 예측), Reference Stress Approach(참조응력법), Surface Crack(표면균열)

Abstract

This paper provides the fully plastic J solutions for circumferential cracked pipes with inner, semi-elliptical surface cracks, subject to internal pressure and global bending. Solutions are given in the form of two different approaches, the GE/EPRI approach and the reference stress approach. For the GE/EPRI approach, the plastic influence functions for fully plastic J are tabulated based on extensive 3-D FE calculations using the Ramberg-Osgood (R-O) materials, covering a wide range of pipe and crack geometries. The developed GE/EPRI-type fully plastic J estimation equations are then re-formulated using the concept of the reference stress approach for wider applications. Based on the FE results, optimized reference load solutions for the definition of the reference stress are found for internal pressure and for global bending. Advantages of the reference stress based approach over the GE/EPRI-type approach are fully discussed. Validation of the proposed reference stress based J estimation equations will be given in Part II, based on 3-D elastic-plastic or elastic creep FE results using typical tensile properties of stainless steels and generalized creep-deformation behaviours.

1. 서론

배관 구조물의 안전성 평가를 위해서는 반다면 표면균열에 대한 정확한 J-적분의 예측이 필수적이다. 현재 J-적분을 예측하기 위해 가장 널리 사용되는 방법은 GE/EPRI 방법^(1,2)이다. 이 방법은 J-적분을 계산하기 위해 소성역 영향함수(plastic influence function)를 사용한다. 소성역 영향함수는 Ramberg-Osgood(R-O) 재료에 대한 3 차원 유한요소해석으로부터 얻어지며, 균열형상 및 변형률 경

화지수(strain hardening exponent)의 영향을 받는다. 따라서 GE/EPRI 방법은 막대한 3 차원 탄소성 유한요소해석이 필요하며, 이런 이유로 오늘날까지 매우 제한된 형상과 하중 상태에 대해서만 해가 구하여 졌다.^(1,2) 특히 배관에 존재하는 표면균열에 대한 해는 선 스프링 (line-spring) 모델과 같은 근사화된 유한요소해석이나 공학적 판단에 기초하고 있다. 또한, GE/EPRI 방법은 인장 데이터의 R-O 이상화 방법에 매우 민감하며, 따라서 부정확한 계산결과를 초래할 수 있다.⁽³⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 J-적분을 파손평가선도(failure assessment diagram)와 탄성해석으로부터 예측할 수 있는 참조응력법(reference stress method)⁽⁴⁾이 제시되었다. 이 방법은 복잡한 형상과 하중상태에 대해 쉽게 적용할 수 있다는 것이 장점이다. 그러나 표면 균

* 회원, 성균관대학교 기계공학부
† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr
TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

열의 경우, 참조 응력을 정의하는데 사용되는 한계하중(limit load)이 국부 한계하중(local limit load)과 광범위 한계하중(global limit load)의 두가지 형태로 정의되며, 한계하중의 정의방법에 따라 J -적분 예측결과는 아주 다르게 나타난다.

표면균열에 대한 또다른 문제점은 최대 균열진전하중(crack driving force)이 균열 최심점 뿐만 아니라 균열면 임의의 위치에서 발생한다는 것이다. 따라서 표면균열에 대한 공학적 J -적분 예측식은 균열 최심점 뿐만 아니라 표면점을 포함한 균열면 임의의 위치에서의 J -적분을 계산할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 내압과 굽힘 모멘트 하중하에서 배관 내벽에 존재하는 원주방향 균열에 대한 공학적 J -적분 예측식을 제시하였다. 이를 위해 먼저 GE/EPRI 방법에 기초하여 소성역 영향 함수를 결정하였으며, 해석결과를 재정리하여 참조응력개념을 도입한 새로운 공학적 J -적분 예측식을 제시하였다. 제시된 J -적분 예측식은 Part II 에서 다양한 3 차원 유한요소해석결과와 비교함으로써 타당성을 입증할 예정이다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 내압 p 와 굽힘 모멘트 M 하중하에서 배관에 존재하는 원주방향 반타원 균열에 대한 3 차원 유한요소해석을 수행하였다. 균열 형상 변화가 J -적분에 미치는 영향을 고려하여 균열깊이 대 배관 두께 비(a/t)를 0.1, 0.3,

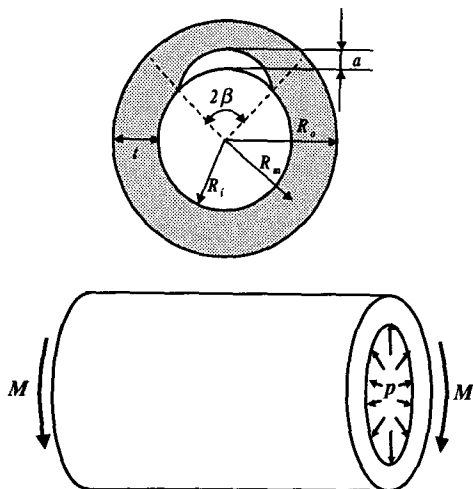


Fig. 1 Schematic illustration for a circumferential cracked pipe

0.5, 0.75 로 변화시켰으며, 균열각 대 원주비(β/π)를 0.1, 0.25, 0.4 로 변화시켰다. 배관의 평균반경 대 배관두께 비(R_m/t)는 배관의 실제 크기를 고려하여 두가지 경우(5, 20)에 대한 해석을 수행하였다. 따라서 총 24 가지 균열형상에 대한 해석을 수행하였다.

2.2 재료물성

유한요소해석에 사용된 재료는 다음의 R-O 관계식을 만족한다고 가정하였다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서 α 와 n 은 각각 재료상수와 재료 가공경화지수, ϵ_0 는 σ_0/E 이다. 본 연구에서는 α 와 σ_0 는 각각 1.0 그리고 400 MPa 을 사용하였으며, n 은 1(탄성), 3, 5, 10 으로 변화시켰다.

2.3 유한요소해석

유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁵⁾를 사용하였다. 유한요소모델은 Fig. 2 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. 하중조건은 내압과 굽힘 모멘트를 각각 유한요소모델에 작용시키고 재료물성을 변화시켜, 총 192 개의 유한요소해석을 수행하였다. 내압 작용시, 배관 끝단에 압력에 해당하는 인장하중을 가하였으며, 균열면 압력 효과를 고려하였다.

J -적분은 ABAQUS 에서 제공하는 영역적분법을 이용하여 유한요소해석결과로부터 계산하였다. J -적분은 균열 최심점에서 계산하였으며¹, 경로 독립성이 유지되는 2~5 번째 경로에 대한 평균값으로부터 결정하였다.

3. GE/EPRI 방법

탄성 유한요소해석결과($n=1$ 인 경우)로부터 얻은 J -적분(J_e)으로부터 응력확대계수 K 는 다음과 같이 결정된다.

¹ 여기서는 최심점에서의 해석결과를 기초로 J -적분 계산식을 제시하였으나, 본 고에 제시된 최적참조응력법에 기초한 J -적분 계산식은 균열면 임의의 점에서도 적용 가능하다. (Part II 참고)

$$\sqrt{E'J_e} = K = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \cdot F \quad (2)$$

여기서 평면응력(plane stress) 조건시 $E' = E$, 평면 변형률(plane strain) 조건시 $E' = E/(1-\nu^2)$ 이다. σ^∞ 은 공칭응력(nominal stress)이며 내압과 굽힘 모멘트에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma^\infty = \begin{cases} \frac{pR_m}{2t} & (\text{내압의 경우}) \\ \frac{4MR_m}{\pi(R_o^4 - R_i^4)} & (\text{굽힘 하중의 경우}) \end{cases} \quad (3)$$

식 (2)에서 F 는 응력확대계수에 대한 형상함수

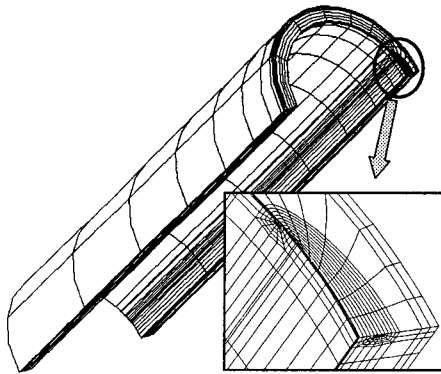


Fig. 2 A typical FE mesh for $R_m/t=5$, $a/t=0.3$ and $\beta/\pi=0.1$

Table 1 Values of the shape factor F under internal pressure

R_m/t	β/π	a/t			
		0.1	0.3	0.5	0.75
5	0.1	1.347	1.333	1.288	1.179
	0.25	1.361	1.488	1.626	1.764
	0.4	1.369	1.530	1.750	2.059
20	0.1	1.224	1.481	1.810	2.051
	0.25	1.228	1.533	2.019	2.689
	0.4	1.230	1.545	2.078	2.936

Table 2 Values of the shape factor F under global bending

R_m/t	β/π	a/t			
		0.1	0.3	0.5	0.75
5	0.1	1.018	1.042	1.025	0.973
	0.25	1.038	1.160	1.283	1.416
	0.4	1.046	1.192	1.367	1.621
20	0.1	1.136	1.385	1.701	1.936
	0.25	1.143	1.436	1.892	2.511
	0.4	1.149	1.452	1.948	2.717

를 나타낸다. Table 1, 2는 유한요소해석으로부터 구한 균열 최심점에서의 F 를 내압과 굽힘 모멘트에 대해 각각 나타낸 것이다.

유한요소해석결과의 타당성을 검증하기 위해 인장하중(tension)과 굽힘모멘트(global bending)하중 하에서 F 를 기존해와 비교하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 유한요소해석결과는 기존해^(2,6)와 잘 일치하였다. 참고로 Zahoor의 해는 균열길이가 깊을 경우 신뢰성이 떨어진다고 이미 지적된 바 있다.

R-O 재료의 경우, J -적분의 소성성분 J_p 는 배관에 존재하는 반타원 원주방향 균열에 대해 다음과 같이 정의된다.⁽¹⁾

$$J_p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 (t-a) \frac{a}{t} h_1(n) \left(\frac{Q}{Q_L} \right)^{n+1} \quad (4)$$

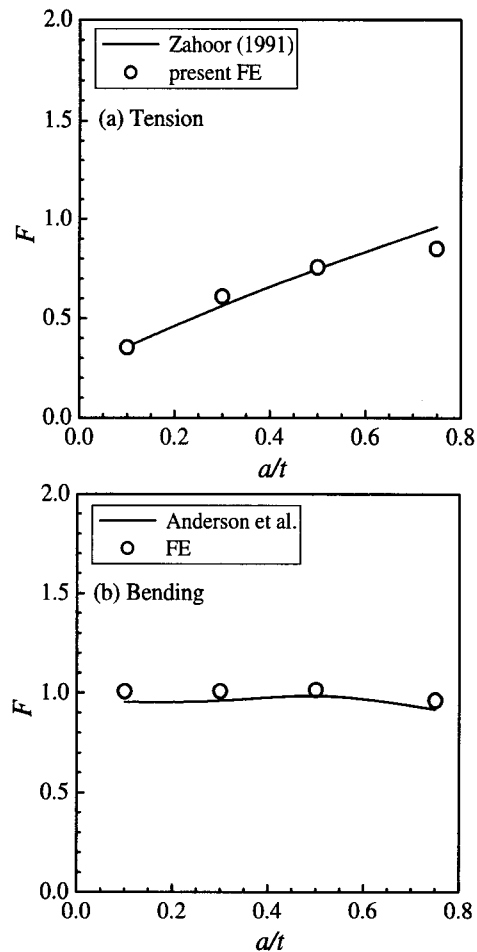


Fig. 3 Comparison of F from the FEM with existing solutions (Zahoor⁽²⁾, Andersson *et al.*⁽⁶⁾) for $R_m/t=5$, $\beta/\pi=0.1$: (a) tension and (b) global bending

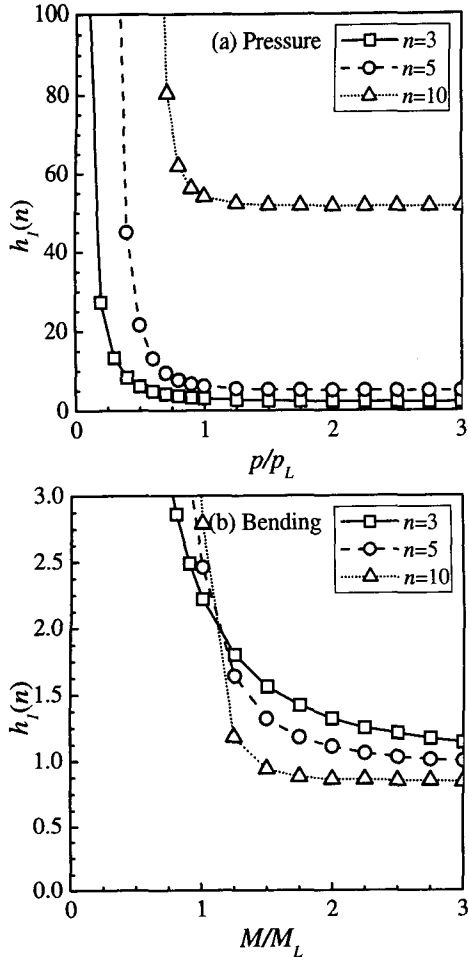


Fig. 4 Variation of the $h_l(n)$ values with the load magnitude, for $a/t=0.1$ and $\beta/\pi=0.4$: (a) internal pressure and (b) global bending

여기서 $h_l(n)$ 은 J_p 에 대한 소성 영향 함수, Q 는 하중(내압이나 굽힘모멘트), Q_L 은 Q 에 대한 소성한계하중(소성한계압력 p_L 이나 소성한계모멘트 M_L)을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 Q_L 은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$p_L = \frac{2\sigma_0 t}{R_m} \left(1 - \frac{\beta a / t + 2 \sin^{-1} [a \sin \beta / 2t]}{\pi} \right) \quad (5)$$

$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_0 \left(\cos \left[\frac{a\beta}{2t} \right] - \frac{a \sin \beta}{2t} \right) \quad (6)$$

$h_l(n)$ 을 결정하기 위해 먼저 유한요소 J -적분 결과에서 탄성성분을 빼서 소성성분, J_p 를 결정한다.

$$J_p^{FE} = J^{FE} - J_e \quad (7)$$

계산된 J_p 와 식 (4)를 이용하여 $h_l(n)$ 을 결정한다. $h_l(n)$ 은 하중크기에 따라 민감하게 변화하며 Fig. 4에서와 같이 충분히 큰 하중에서 일정하게 유지된다. 본 연구에서는 이 값을 사용하여 $h_l(n)$ 을 결정하였다. Table 3, 4는 각각 내압과 굽힘 모멘트하중에 대해 결정된 $h_l(n)$ 을 나타낸다.

본 절에서 제시한 J -적분 예측식은 GE/EPRI 방법에 기초한 것으로 내압과 굽힘 모멘트하에서 원주방향 반다면 표면균열에 대한 J -적분 예측에 사용할 수 있다. 그러나 GE/EPRI 방법은 전술한 바와 같이 많은 문제점을 가지고 있다. 무엇보다도 일반적인 배관 건전성 평가는 내압과 굽힘 모멘트가 복합된 형태이며, 이 경우 해를 제공하기 위해서는 막대한 3 차원 유한요소해석이 수행되어야 한다. 본 연구를 예로 들면, 두 가지 단순한 하중에 대한 J -적분 예측식을 제시하기 위해 총 192개의 유한요소해석을 수행하였다. 따라서 이 방법은 모든 가능한 복합 하중에 대한 해를 제공하기 위해서는 비 현실적이다. 또한 이 방법은 R-O 이상화방법과 관련된 비정확성 문제를 안고 있다. R-O 이상화는 일반적인 재료에 대한 인장데이터를 적절히 모사하지 못한다고 알려져 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 참조응력법을 도입하여 J -적분 계산식을 재정리하였다.

4. 참조응력법

참조응력법에 기초한 J -적분 예측법의 기본 개념은 Ainsworth⁽⁴⁾가 제시한 것처럼 적절한 참조응력이 소성영역 영향 함수에 미치는 변형률 경화 지수의 영향을 최소화 할 수 있다는 것이다. 식 (2)와 (4)로부터 J_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} = \sigma_o \epsilon_o (t-a) \frac{a}{t} h_l(n=1) \left[\frac{Q}{Q_L} \right]^2 \quad (8)$$

여기서 $h_l(n=1)$ 은 탄성영역($n=1$)인 경우에 대한 $h_l(n)$ 이다. 식 (2)를 식 (8)에 대입하면 $h_l(n=1)$ 의 값을 균열형상의 함수로 구할 수 있다. 이렇게 계산된 $h_l(n=1)$ 값들은 내압과 굽힘 모멘트에 대해 각각 Table 3, 4에 제시하였다. 식 (8)을 식 (4)로 무차원화시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \frac{h_l(n)}{h_l(n=1)} \left[\frac{Q}{Q_L} \right]^{n-1} \quad (9)$$

Table 3 Values of the plastic influence function $h_1(n)$ under internal pressure

R_m/t	a/t	β/π	n			
			1	3	5	10
5	0.1	0.1	5.54	13.35	35.73	480.61
		0.25	5.34	11.94	29.82	352.26
		0.4	5.15	10.84	25.49	265.61
	0.3	0.1	6.42	15.77	39.66	443.98
		0.25	6.65	13.44	27.95	199.40
		0.4	5.95	10.27	18.01	85.56
	0.5	0.1	7.70	18.99	45.00	422.67
		0.25	8.78	16.07	27.71	117.36
		0.4	7.34	10.24	12.92	25.49
	0.75	0.1	11.51	27.56	61.06	471.77
		0.25	14.65	23.67	32.53	77.89
		0.4	10.61	10.78	8.70	5.63
20	0.1	0.1	4.57	11.88	33.16	478.45
		0.25	4.35	10.59	27.81	346.69
		0.4	4.15	9.60	23.87	261.80
	0.3	0.1	7.92	21.67	57.62	687.70
		0.25	7.05	16.29	36.25	274.53
		0.4	6.07	12.01	22.60	113.87
	0.5	0.1	15.20	41.95	103.55	1011.90
		0.25	13.52	29.14	53.69	239.60
		0.4	10.34	16.99	22.92	47.47
	0.75	0.1	34.85	93.03	224.03	1881.42
		0.25	34.05	60.56	93.75	253.60
		0.4	21.58	23.73	21.24	17.07

Table 4 Values of the plastic influence function $h_1(n)$ under global bending

R_m/t	a/t	β/π	n			
			1	3	5	10
5	0.1	0.1	5.07	5.93	5.39	5.11
		0.25	5.05	5.96	5.51	5.13
		0.4	4.99	5.68	4.99	4.31
	0.3	0.1	6.39	8.50	8.11	7.75
		0.25	6.87	8.73	8.11	6.55
		0.4	6.50	7.64	6.45	4.21
	0.5	0.1	8.07	10.98	10.39	8.88
		0.25	9.67	11.38	9.18	5.04
		0.4	8.64	8.81	5.91	2.29
	0.75	0.1	13.23	16.74	15.60	13.47
		0.25	17.43	17.30	12.52	5.46
		0.4	13.63	10.80	5.86	1.24
20	0.1	0.1	6.44	6.65	6.56	5.95
		0.25	6.25	6.43	5.73	5.37
		0.4	6.14	6.21	5.40	4.65
	0.3	0.1	11.51	16.69	18.34	21.08
		0.25	10.73	14.64	15.12	14.69
		0.4	9.83	12.35	11.60	9.16
	0.5	0.1	22.66	35.12	35.59	35.25
		0.25	21.43	30.36	27.54	20.30
		0.4	17.87	22.21	17.44	9.09
	0.75	0.1	53.42	68.74	73.14	77.53
		0.25	55.85	63.79	58.12	32.76
		0.4	39.03	34.95	23.29	6.12

Fig. 5는 변형률 경화지수에 대한 $h_1(n)/h_1(n=1)$ 값의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서와 같이 $h_1(n)/h_1(n=1)$ 는 n 에 따라 민감하게 변화하며 특히 내압의 경우 그 변화가 크다.

만약 Q_L 대신에 기준 하중 Q_{ref} 을 도입하면 식 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \left\{ \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \left[\frac{Q_{ref}}{Q_L} \right]^{n-1} \right\} \left[\frac{Q}{Q_{ref}} \right]^{n-1} \quad (10)$$

$h_1(n)/h_1(n=1)$ 와 Q_L/Q_{ref} 이 무차원 변수이므로 식 (10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha H_1 \left[\frac{Q}{Q_{ref}} \right]^{n-1} \quad (11)$$

여기서 H_1 은 일반적으로 구조물 형상과 n 의 함수이다. 언급한 바와 같이 참조응력법의 기본 개념은 적절한 Q_{ref} 의 정의가 H_1 에 대한 구조물 형상과 가공경화지수의 영향을 최소화할 수 있다는 것

이다. 이러한 참조하중을 본 연구에서는 최적참조하중 Q_{OR} 이라고 정의하였다. Q_{OR} 을 결정하는 구체적인 방법은 없다. 공학적 직관과 시행착오과정에 기초하여 Q_{OR} 에 대한 다음 식을 제시하였다.

$$Q_{OR} = p_{OR} = \gamma \cdot p_L \quad \text{내압의 경우}$$

$$\gamma = 1.767(a/t)(\beta/\pi) - 0.156(a/t) - 0.101(\beta/\pi) + 0.627 \quad (12)$$

$$Q_{OR} = M_{OR} = \gamma \cdot M_L \quad \text{굽힘 하중의 경우}$$

$$\gamma = \theta_1(a/t)^2 + \theta_2(a/t) + 1.04$$

$$\theta_1 = 4.26(\beta/\pi)^2 - 1.35(\beta/\pi) + 0.80 \quad (13)$$

$$\theta_2 = -2.30(\beta/\pi)^2 + 1.57(\beta/\pi) - 0.77$$

여기서 p_L 과 M_L 은 식 (5), (6)으로부터 얻어진다. γ 는 내압의 경우 0.6 ~ 1.1로 변화하며, 굽힘모멘트의 경우 거의 1에 가까운 값을 나타내며 0.9~1.2로 변화한다.

본 연구에서 제시한 Q_{OR} 을 Q_{ref} 라 하면 식 (11)로부터 H_1 값을 계산할 수 있다. 계산된 H_1 은 Fig. 6에 보이는 바와 같이 n 의 영향이 매우 적으며,

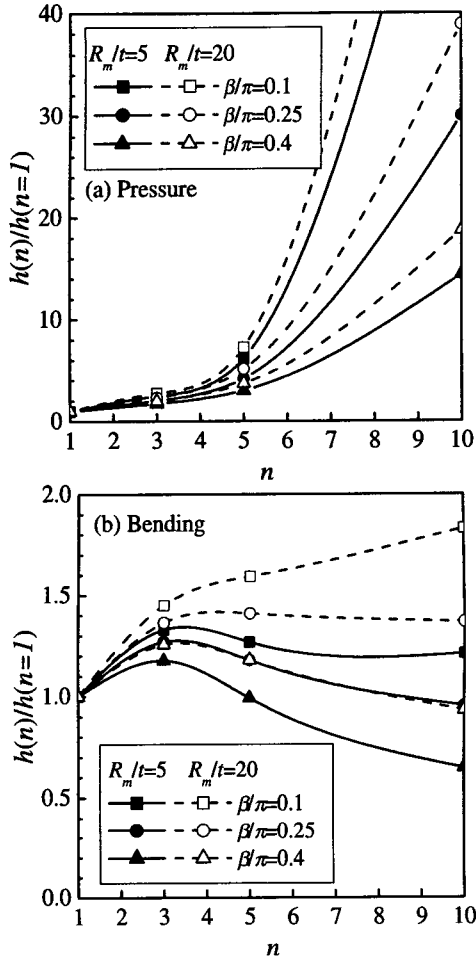


Fig. 5 Variations of the $h_i(n)/h_i(n=1)$ values with n , $a/t=0.3$: (a) internal pressure and (b) global bending

모든 경우에 대해 1에 가깝다고 볼 수 있다. 따라서 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{J_p}{J_e} \approx \alpha \left[\frac{Q}{Q_{OR}} \right]^{n-1} \quad (14)$$

R-O 재료의 경우, 소성변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다는 점에 착안하면,

$$\epsilon_p = \alpha \frac{\sigma}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^{n-1} \quad (15)$$

식 (14)와 식 (15)로부터 일반 재료에 대해 다음과 같은 식을 유추할 수 있다.

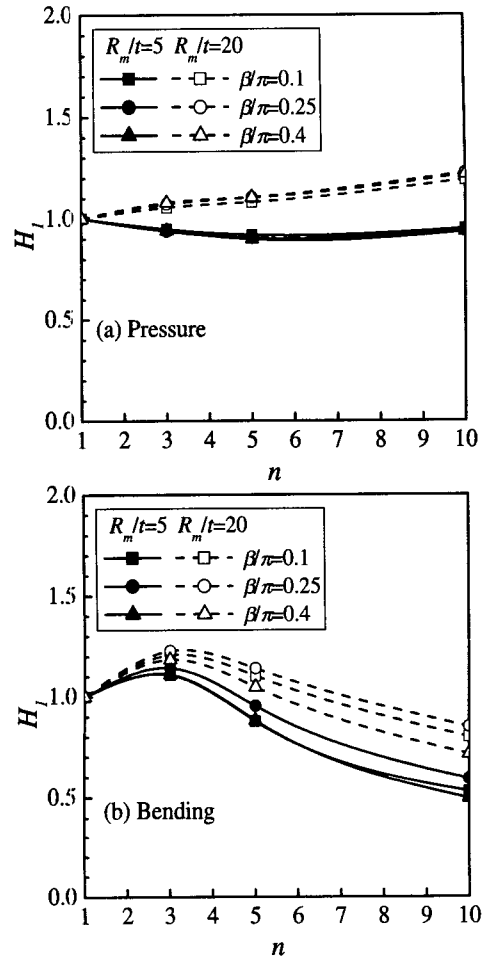


Fig. 6 Variations of the H_i values with n , for $a/t=0.3$: (a) internal pressure and (b) global bending

$$\frac{J_p}{J_e} \approx \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_{OR}} \sigma_o \quad (16)$$

여기서 σ_{ref} 는 참조응력, ϵ_{ref} 은 $\sigma = \sigma_{ref}$ 일 때 진응력-변형률 선도로부터 얻어지는 진변형률(true strain)이다. 여기서 중요한 점은 식 (16)은 R-O 재료에 제한되지 않으며, 임의의 응력-변형률 선도를 가지는 재료에 적용할 수 있다는 것이다. 식 (16)은 소성 J-적분에 대한 예측식으로, 전체 J-적분은 소성 보정역을 가지는 탄성성분을 추가하여 예측한다.⁽⁸⁾

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\sigma_o} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E \epsilon_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_{OR}} \sigma_o \quad (17)$$

5. 토 의

본 연구에서 제안한 참조응력에 기초한 J -적분 예측식은 현재 널리 사용되고 있는 구조물 수명 평가 절차인 R6⁽⁸⁾와 R5⁽⁹⁾에 제시된 방법과 유사하다. 그러나 R6 와 R5 에서는 참조응력을 소성한계 하중으로 정의한 반면 본 연구에서는 최적참조하중을 참조응력으로 정의하였다. 일반적으로 소성한계하중과 최적참조하중의 차이는 크지 않다.⁽¹⁰⁾

Fig. 7 은 다양한 소성한계하중해와 최적참조하중과 비교한 것이다. 사용된 소성한계하중해는 Miller 의 광범위 한계하중해,⁽⁷⁾ Miller 의 국부한계하중해,⁽⁷⁾ Wilkowski 와 Eiber 해⁽¹¹⁾이다. 또한 탄성

완전 소성(elastic-perfectly-plastic) 재료에 대한 유한요소해석결과로부터 얻은 광범위 한계하중해⁽¹²⁾를 Fig. 7 에 도시하였다.

굽힘 모멘트의 경우, 유한요소 한계하중해는 Miller 의 광범위 한계하중해보다 크다. 두 해의 차이는 at 와 β/π 가 커질수록 증가한다. 이는 Miller 의 해가 Tresca 항복조건에 기초하고 있는 반면, 유한요소해는 Mises 항복조건에 기초하기 때문이다. 최적 참조하중은 작은 β/π , at 에 대해 Miller 의 국부한계하중해와 유사하며, β/π , at 가 증가할수록 Miller 의 광범위 한계하중해와 가까워진다. 전체적으로 최적참조하중과 Miller 의 광범위, 국부한계하중해의 차이는 크지 않다.

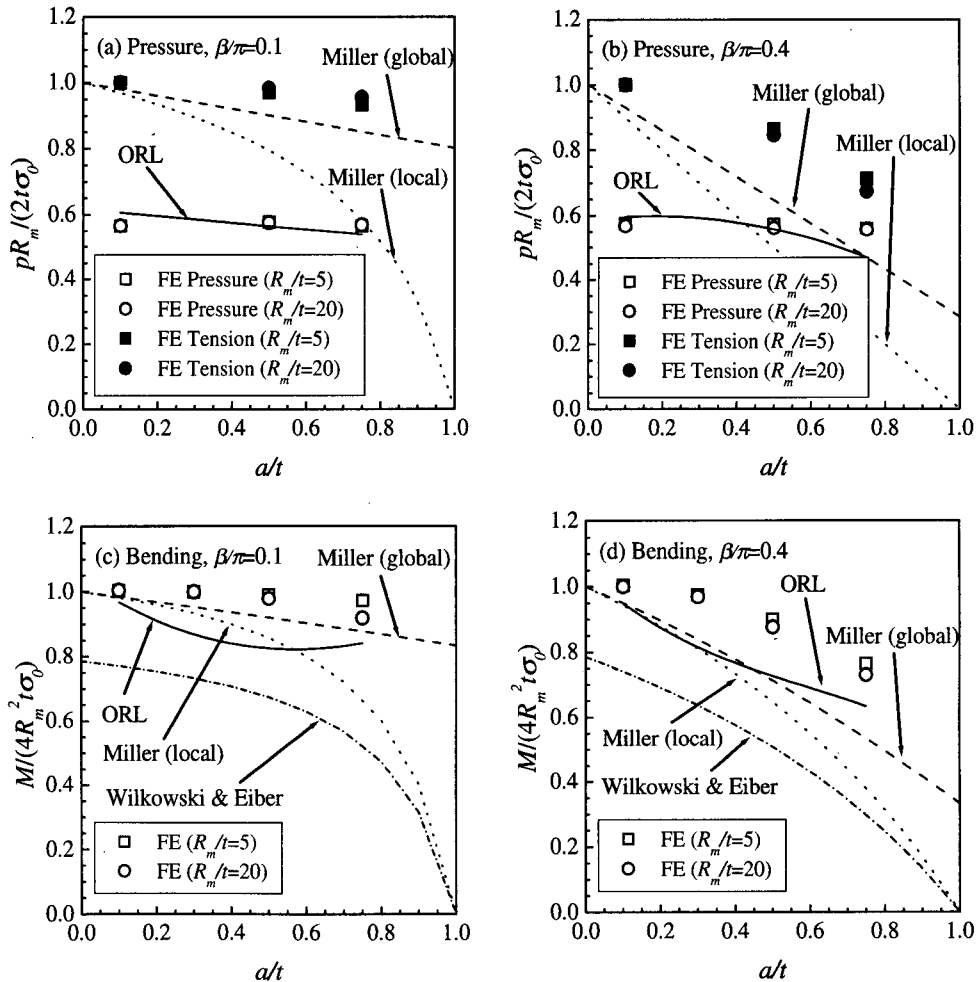


Fig. 7 Comparison of the proposed optimised reference load solutions with existing limit load solutions, for internal pressure: (a) $\beta/\pi=0.1$ and (b) $\beta/\pi=0.4$, for global bending: (c) $\beta/\pi=0.1$ and (d) $\beta/\pi=0.4$. Note that the "ORL" denotes optimised reference loads, eqns. (12) and (13). In Figs. 7(a) and 7(b), "FE tension" denotes the FE results for axial tension, whereas "FE pressure" denotes those for internal pressure

내압의 경우, 최적참조하중은 기존 한계하중해와 차이가 심하다. 이는 기존의 한계하중해는 내압으로 인한 원주방향응력영향을 고려하지 않기 때문이다. 실제로 Fig. 7 (a), (b)에 나타난 바와 같이 균열깊이가 깊은 경우($a/t=0.75$)를 제외하고는 내압에 대한 최적참조하중은 유한요소해석결과로부터 얻은 한계하중해와 5%이내로 잘 일치한다. 균열 깊이가 깊은 경우 균열구조물의 소성붕괴는 국부한계하중에 의해 이루어지므로 최적참조하중과 유한요소해석결과보다 낮게 나타난다. 따라서 Fig. 7 은 최적참조하중이 한계하중해와 유사하다는 것을 나타낸다.

그러나 J -적분은 하중에 대해 $(n+1)$ 급수에 비례하므로 하중크기에 있어서 작은 차이는 J -적분에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 방법은 R6 와 R5 방법의 정확성을 현저히 향상시킬 수 있다.

큰 열응력을 받는 균열을 가진 가압배관과 같은 경우, 표면균열에 최대 균열진전하중의 값은 최심점에서가 아니라 표면점을 포함한 임의의 위치에서 발견된다. 따라서 균열면을 따라서 임의의 위치에서의 J -적분을 예측하기 위한 공학적 방법이 제시되어야 한다. 이 경우, GE/EPRI 방법은 균열면을 따라 모든 점에서의 소성영향함수의 계산이 필요하다. 그러나 참조응력법의 경우, 임의의 위치에서의 J -적분을 예측하는데 사용되는 최적참조응력은 동일하게 정의된다.⁽¹³⁾ 제안된 최적참조응력법에 입각한 J -적분 예측식의 임의위치에 대한 적용성은 Part II 에서 검증할 예정이다.

6. 결론

본 연구에서는 배관에 존재하는 원주방향 표면 균열에 대한 공학적 J -적분 예측식을 제시하였다. 예측식은 GE/EPRI 법과 참조응력법 두가지 방법으로 제시하였다. GE/EPRI 방법의 경우, R-O 재료에 대한 3 차원 유한요소해석을 통해 J -적분 예측에 필요한 소성 영향 함수를 제시하였다. 참조응력법의 경우, 이러한 유한요소 해석결과를 이용하여 새로운 참조응력인 최적참조하중해를 내압과 굽힘 모멘트에 대해 제시하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산

업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kumar, V. and German, M.D., 1998, *Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders*, EPRI Report, NP-5596.
- (2) Zafoor, A., 1991, *Ductile Fracture Handbook*, Novotech Corp. 3 Volumes.
- (3) 허남수, 김윤재, 김영진, 2000, "원자력배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 대한기계학회논문집 A 권 제 25 권 제 4 호, pp. 741~747.
- (4) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (5) ABAQUS, 1998, *ABAQUS Standard/User's Manual, Version 5.8-1*, Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA US.
- (6) Andersson, P., Bergman, M., Brickstad, B., Dahlberg, L., Nilsson, F. and Sattari-Far, I., 1996, *A Procedure for Safety Assessment of Components with Cracks-Handbook*, SAQ/FoU-Report 96/08.
- (7) Miller, A.G., 1987, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 191~327.
- (8) R6, 1999, *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 3, Amendment 10*, British Energy.
- (9) R5, 1998, *Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2*, British Energy.
- (10) Kim, Y.-J., Kim, J.-S., Huh, N.-S. and Kim, Y.-J., 2001, "Engineering C-Integral Estimation For Generalised Creep Behaviours And Finite Element Validation," *Submit to International Journal of Pressure Vessels and Piping*.
- (11) Wilkowski, G. and Eiber, R.J., 1980, "Evaluation of Tensile Failure of Girth Weld Repair Grooves Subjected to Offshore Laying Stress," *Energy Sources Technology Conference*, New Orleans.
- (12) Kim, Y.-J., Shim, D.-J., Choi, J.-B. and Kim, Y.-J., 2001, "Finite Element Limit Analyses of Surface Cracked Pipes," *Submit to International Journal of Fracture*.
- (13) 심도준, 김윤재, 최재봉, 김영진, 2001, "인장하중이 작용하는 평판에 존재하는 반타원 표면균열의 J -적분 계산식," 대한기계학회논문집 A 권 제 25 권 제 11 호, pp. 1777~1784.