2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

개선된 참조응력법을 이용한 파단전누설 해석

Enhanced Reference Stress Method for LBB Analysis

허남수, 김윤재, 김영진
성균관대학교
경기도 수원시 장안구 천천동 300

정대율, 박치용
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 논문의 목적은 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분과 COD 예측을 위한 개선된 참조응력법을 제안하고 그 타당성을 입증하는 것이다. 이를 위해 기존의 참조응력법을 수정하여 인장 하중과 굽힘 모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분 및 COD 평가식을 제시하고, 예측 결과를 실배관 실험 결과와 비교하였다. 또한 실제 응력-변형률 곡선을 사용한 3차원 유한요소해석을 수행하여 J-적분과 COD 값을 예측하여 본 연구에서 제안한 개선된 참조응력법으로 구한 결과와 비교하였으며, GE/EPRI 법을 이용하여 예측한 결과와도 비교하였다. 개선된 참조응력법으로 예측한 COD 값은 실배관 실험으로 구한 결과와 잘 일치하였으며, 3차원 유한요소해석으로 구한 J-적분 및 COD 값과도 잘 일치하였다. 그러나 GE/EPRI 법으로 구한 J-적분 및 COD 값은 실험 결과 및 유한요소해석 결과와 큰 차이를 보였으며, 해석 결과가 Ramberg-Osgood 곡선 적합 방법에 큰 영향을 받았다. 따라서 본 연구에서 제안한 개선된 참조응력법은 향후 원자력발전소 배관의 파단전누설 해석에 널리 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

This paper proposes the enhanced reference stress (ERS) method to estimate the elastic-plastic J-integral and crack tip opening displacement (COD) for circumferential through-wall cracked pipes. To validate the proposed COD estimation equations, the results from published pipe test data are compared with the proposed ones. Furthermore, the J-integral and CODs predicted using the proposed method are also compared with those of based on three dimensional elastic-plastic finite element analyses. The results show good agreement with pipe test data and the 3-D FE data. The present results provide confidence in applying the proposed ERS method to the Leak-before-Break analysis.

1. 서 론

최근 원자력발전소 배관의 새로운 설계 개념으로 파단전누설(Leak-before-Break; LBB) 개념이 신규 및 가동중인 원자력발전소의 배관 설계시 널리 적용되고 있다. LBB 개념의 적용을 위해서는 탄소성 파괴역학(Elastic-Plastic Fracture Mechanics; EPFM)을 이용하여 대상 배관계에 대한 균열 안정성 평가를 수행하여 건전성을 입증하여야 한다. 따라서 원자력발전소 배관에 대한 LBB 해석을 위해서는 EPFM 매개변수인 *J*-적분과 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)의 정확한 산출이 필수적이다. 작용 하중에 의한 *J*-적분과 COD를 예측하는 방법으로는 이론적인 방법, 공학적인 방법(engineering estimation scheme), 그리고 유한요소해석을 이용한 방법이 있다. 이론적인 방법은 해석상의 어려움으로 인해서 이론해가 규명되어 있는 경우가 많지 않으므로 실제 문제에는 거의 적용되지 못하고 있다. 따라서 현재에는 유한요소해석을 이용한 방법과 공학적인 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 유한요소해석은 비교적 정확한 결과를 제공하나 해석에 많은 시간이 소요된다는 문제점이 있다. 공학적인 방법 가운데 가장 널리 사용되고 있는 방법이 GE/EPRI법[1]과 참조응력법(reference stress method)[2]이다. 그러나 GE/EPRI법은 해석시 입력조건으로 사용되는 Ramberg-Osgood 상수가 응력-변형률 곡선의 곡선 적합(curve fitting) 구간 및 방법에 민감하기 때문에 해석 결과도 크게 영향을 받는다는 문제가 있다[3]. 참조응력법은 GE/EPRI법과는 달리 사용이 매우 편리하고 해석 결과가 비교적 안정적이기 때문에 R6 평가법[4] 등에 적용되고 있으나 이 방법도 참조응력의 정의에 따라 해석 결과가 크게 변할 수 있다. 현재는 소성 한계 하중(plastic limit load)이 참조응력으로 사용되고 있으나 해석 결과가 지나치게 보수적일 수도 있다. 따라서 보다 정확하게 *J*-적분과 COD를 예측할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문의 목적은 기존의 참조응력법을 수정하여 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 *J*-적분과 COD 예측을 위한 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법을 제안하고, 그 타당성을 배관 실험 결과와 실제 응력-변형률 곡선을 사용한 3차원 유한요소해석으로 입증하는 것이다. 또한 원자력발전소 배관의 건전성 평가에 널리 사용되고 있는 공학적 평가식인 GE/EPRI[1,5]법으로 예측한 결과와도 비교하고자 한다.

2. ERS 법을 이용한 *J*-적분 및 COD 평가식

2.1 *J*-적분 및 COD 평가식

본 논문에서 제안하는 *J*-적분 및 COD 평가식은 배관 재료의 인장 특성 보유율에 따른 2가지의 식으로 구성되어있다. 만약 재료의 응력-변형률 곡선이 있으면 옵션 2식을 사용하며, 재료의 항복 강도와 인장 강도만을 보유하고 있으면 옵션 1식을 사용한다.

2.1.1 옵션 2 평가식

옵션 2의 *J*-적분 평가식은 다음과 같다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2}\frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (1)$$

여기서, J_e는 *J*-적분의 탄성 성분이며 σ_{ref}는 참조응력이다. ε_{ref}는 참조응력에서 정의되는 변형률이며, L_r은 소성붕괴 또는 소성역의 성장 정도를 나타내는 매개변수로 다음과 같이

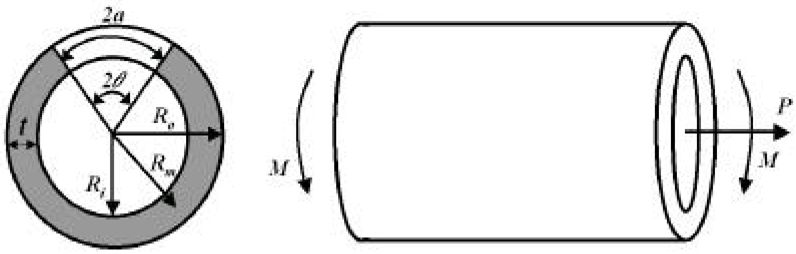

Fig. 1 Circumferential through-wall cracked pipes under axial tension and under bending

정의된다.

$$L_r = s_{ref} / s_y = P / P_o^* = M / M_o^* \tag{2}$$

여기서, P 와 M 는 작용 하중 및 작용 모멘트이고, P_o^* 와 M_o^* 는 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 한계 하중(P_L)과 한계 모멘트(M_L)로부터 다음과 같이 정의되는 최적참조하중(optimised reference load)이다.

$$P_o^* = g(q) P_L \quad ; \quad M_o^* = g(q) M_L \tag{3}$$

$$g(q) = 0.82 + 0.75\left(\frac{q}{p}\right) + 0.42\left(\frac{q}{p}\right)^2 \quad for\ q/p \le 0.5 \tag{4}$$

$$P_L = 2R_m t s_y \left[p - q - 2\,sin^{-1}\left(\frac{1}{2} sin q\right)\right] \tag{5}$$

$$M_L = 4{R_m}^2 t s_y \left[cos\left(\frac{q}{2}\right) - \frac{1}{2} sin q\right] \tag{6}$$

옵션 2 의 COD 평가식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{d_e} = \begin{cases} \dfrac{Ee_{ref}}{s_{ref}} + \dfrac{1}{2}\dfrac{L_r^2 s_{ref}}{Ee_{ref}} & for \quad 0 \le L_r \le 1 \\ \left(\dfrac{d}{d_e}\right)_{L_r=1} (L_r)^{n_1 - 1} & for \quad 1 < L_r \end{cases} \tag{7}$$

여기서, d_e 는 COD 의 탄성 성분이며 $(d/d_e)_{L_r=1}$ 은 $L_r = 1$ 에서 정의되는 (d/d_e) 를 의미한다. 식 (7)에서 가공경화지수 n_1 은 다음의 식으로부터 구한다.

$$n_1 = \frac{\ln\left[\left(e_{u,t} - s_{u,t}/E\right)/0.002\right]}{\ln\left[s_{u,t}/s_y\right]} \tag{8}$$

여기서, $s_{u,t}$ 와 $e_{u,t}$ 는 진인장강도(true tensile strength)와 그때의 변형률을 의미한다.

2.1.2 옵션 1 평가식

배관 재료의 인장 특성 가운데 항복 강도와 인장 강도만이 존재한다면 다음과 같은 하한계(lower bound) 곡선을 사용하여 J-적분을 예측한다.

$$\frac{J}{J_e}=\left[\frac{1}{\left(1-0.14L_r^2\right)\left\{0.3+0.7exp\left(-0.65L_r^6\right)\right\}}\right]^2 \tag{9}$$

옵션 1 의 COD 평가식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{d_e}=\begin{cases}1+\frac{1}{2}L_r^2 & for \quad L_r<1\\ \frac{3}{2}\left(L_r\right)^{n_2-1} & for \quad L_r\geq 1\end{cases} \tag{10}$$

여기서, n_2 는 항복 강도와 인장 강도의 비(s_y/s_u)를 이용하여 다음의 식으로 구한다.

$$1/n_2=0.629-1.536\left(s_y/s_u\right)+1.723\left(s_y/s_u\right)^2-0.814\left(s_y/s_u\right)^3 \tag{11}$$

식 (10)의 첫 번째 식은 식 (7)의 첫 번째 식을 선형 탄성으로 고려한 경우와 동일하며 LBB 해석시 옵션 1 을 사용한 해석 결과가 옵션 2 를 사용한 경우보다 항상 보수적이다. 즉, 옵션 1 은 옵션 2 보다 J-적분을 크게 예측하며, COD 값은 작게 예측한다.

2.2 ERS 법을 이용한 *J*-적분 및 COD 평가식의 특징

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 제안한 J-적분과 COD 평가식은 참조응력법[2]에 기반을 두고 있다. 본 절에서는 최적참조하중을 이용한 ERS 법의 J-적분과 COD 평가식의 특징에 대해 설명하였다.

2.2.1 가공경화 및 형상 의존성의 최소화

기존의 참조응력은 다음과 같이 균열이 존재하는 구조물의 한계 하중과 관계가 있다[2,4].

$$s_{ref}=\left(\frac{P}{P_L}\right)s_y=\left(\frac{M}{M_L}\right)s_y \tag{12}$$

여기서, P_L 과 M_L 은 식 (5)와 식 (6)에 나타낸 바와 같다. 한계 하중은 사용이 용이하지만 해석 결과가 지나치게 보수적일 수 있다[6]. 따라서 참조응력법을 이용한 J-적분 및 COD 의 소성성분 예측시 보다 정확하게 결과를 예측할 수 있는 새로운 하중의 정의가 필요하다. 이와 같은 하중이 식 (3)에서 정의된 최적참조하중이다. 본 논문에서는 GE/EPRI 법의 해를 이용하여 인장 하중이 작용하는 경우와 굽힘 모멘트가 작용하는 경우의 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 최적참조하중을 식 (3)과 같이 제안하였다. 본 논문에서 제안된 P_o^* 와 M_o^* 를 사용하면 GE/EPRI 법을 이용한 J-적분과 COD 의 소성 성분 산출시 사용되는 소성 영향 함수(h_1, h_2)의 가공경화 의존성을 감소시킬 수 있다. 따라서 참조응력법을 이용하여 J-적분 및 COD 를 예측할 경우, 본 논문에서 제안한 최적참조하중을 사용하면 보다 정확한 값의 예측이 가능하다. 본 논문에서 사용된 최적참조하중의 산출 방법에 대해서는 지면 관계상 다루지 못하였으며 기존에 발표된 문헌[7]에 자세히 기술되어 있다.

2.2.2 완전 소성항의 수정

GE/EPRI 법을 이용하여 COD 를 예측한 결과와 실험 결과를 비교하면 완전 소성 영역에서는 LBB 해석 측면에서 항상 비보수적인 결과를 나타낸다[3]. 즉, GE/EPRI 법으로 예측한 COD 는 같은 하중 하에서 실험 결과보다 항상 크다. 이는 균열이 존재하는 구조물의 하중이나 J-적분과 같은 광범위의 매개변수(global parameter)는 실제 응력-변형률 거동을 따라가는 경향을 보이지만, COD 는 균열 선단에서 측정되는 국부적인 매개변수(local parameter)이기 때문이다. 균열선단의 국부적인 변형률은 광범위한 변형률 값보다 매우 클 수 있다. 그러므로 실제 응력-변형률 곡선을 사용하면 광범위한 매개변수인 J-적분은 정확한 산출이 가능하나 COD 와 같은 국부적인 파괴 매개변수는 정확하지 않을 수 있다. 일반적으로 재료는 작은 변형률 범위에서 낮은 가공경화율을 나타내는데, 이것이 LBB 해석을 위한 COD 산출시 비보수적인 결과의 원인으로 작용될 수 있다.

따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서 제안한 COD 평가식에서는 진 응력-진변형률 곡선의 소성 부분이 다음과 같이 표현될 수 있다고 가정하였다.

$$\frac{e}{e_{p0.2}} = \left(\frac{s}{s_y}\right)^n \qquad for \qquad s \ge s_y \tag{13}$$

여기서, $e_{p0.2}$ 와 s_y 는 각각 0.2% 소성 변형률과 항복 응력을 의미한다. 식 (8)은 0.2% 순수 소성 응력과 인장 강도 사이의 응력-변형률 곡선을 곡선 적합한 것이다. 식 (13)은 가공경화지수 n 과 s_y / s_u 와의 실험적 관계로부터 제안된 식이다.

2.2.3 소성역 보정항의 수정

GE/EPRI 법은 COD 예측시 소성의 영향을 고려하기 위해서 유효균열길이(a_e)를 사용한다. 그러나 이는 계산이 매우 복잡하기 때문에 사용하기가 어렵다. 그러나 본 논문에서 제안한 COD 평가식에서는 소성역 보정항이 R6 평가법의 옵션 2 식[4]에서 사용된 간단한 하나의 항으로 대치된다.

$$W = \frac{1}{2}\frac{L_r^2 s_{ref}}{E e_{ref}} \tag{14}$$

식 (14)는 식 (7)의 첫번째 식에 나타낸 항과 동일하다. 소성역의 영향을 보정하기 위해 Kastner 등[8]은 Irwin 의 소성역 보정 개념을 기반으로 한 모델을 제안한 바 있으며, Wüthrich 등[9]은 Dugdale 의 소성역 보정 개념을 기반으로 한 모델을 제안한 바 있다. 식 (14)는 일반적인 재료에 있어서 위의 두가지 모델을 사용하여 평가한 결과와 잘 일치하였다.

3. 유한요소해석 및 GE/EPRI 법을 이용한 J-적분 및 COD 예측

3.1 유한요소해석

3.1.1 재료물성치

유한요소해석에 사용된 재료물성치는 국내 원자력발전소 배관의 재질로 사용되는 SA312 TP304 와 SA312 TP316 스테인레스강이다. SA312 TP304 스테인레스강의 경우는 50℃에서 수행된 준정적(quasi-static) 실험 결과이며, SA312 TP316 은 20℃ 및 288℃에서 수행된 준정적

실험결과이다. Fig. 2~Fig. 4 에 각각의 재질에 대한 실제 응력-변형률 곡선을 나타내었다. Table 1 은 재료물성치를 정리하여 나타낸 것이다.

3.1.2 해석대상

해석대상은 Fig. 1과 같은 원주방향 관통균열이 존재하는 배관이다. 배관의 외경과 두께는 각각 355.6*mm*, 35.7*mm* 이며, R_m/t 는 4.48 이다. 관통균열의 길이는 배관 원주의 12.5%(q/p=0.125)와 40%(q/p=0.4)의 두가지 경우로 가정하여 해석을 수행하였다. 하중 조건은 순수 굽힘 모멘트만을 고려하였다.

3.1.3 유한요소모델

Fig. 5는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램[10]을 사용하였으며, 20절점 등계수 사각주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였다. 배관 모델에 사용된 요소의 수는 936 개이며, 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 적용하였다.

유한요소해석은 2가지의 균열 길이에 대해 Fig. 2~Fig. 4에 나타낸 실험으로 구한 실제 응력-변형률 곡선을 이용하여 수행하였으며, 균열 길이 및 재료 물성치에 따른 전체 6가지 경우에 대해 해석을 수행하여 *J*-적분과 COD 값을 산출하였다.

3.2 GE/EPRI 법

GE/EPRI 법을 이용하여 *J*-적분 및 COD 값을 예측하기 위해서는 재료의 응력-변형률 곡선을 이용하여 다음과 같은 Ramberg-Osgood 관계식으로 곡선 적합을 수행하여 a와 n 을 구해야 한다.

$$\frac{e}{e_o} = \frac{s}{s_o} + a\left(\frac{s}{s_o}\right)^n \tag{15}$$

여기서, s_o 는 기준 응력으로서 일반적으로 재료의 항복 강도(yield strength)를 사용한다. e_o 는 기준 변형률이다.

본 논문에서는 Ramberg-Osgood 상수가 GE/EPRI 법을 이용한 예측 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해서 곡선 적합 구간을 3가지로 구분하였다. 첫번째 경우는 전체 응력-변형률 곡선을 이용하여 곡선 적합을 수행하였으며(Fit A), 두번째 경우는 5% 변형률 까지의 응력-변형률 곡선을 이용하여 곡선 적합을 수행하였다(Fit B)[11]. 세번째 경우는 0.1% 변형률부터 $0.8e_u$ 까지의 구간을 이용하여 곡선 적합을 수행하였다(Fit C)[12]. 곡선 적합에는 미국 바텔 연구소에서 개발한 ROFIT 프로그램[13]이 사용되었다. Fig. 2~Fig. 4에 곡선 적합 결과와 실제 응력-변형률 곡선을 비교하여 나타내었으며, 곡선 적합으로 구한 Ramberg-Osgood 상수를 Table 2에 정리하여 나타내었다. SA312 TP304 와 SA312 TP316 고온의 경우, 전체 응력-변형률 곡선을 사용하여 곡선 적합을 수행한 "Fit A"가 실제 응력-변형률 곡선과 잘 일치하였으며, 낮은 변형률 범위에서는 3가지 곡선 적합 방법 모두가 실제 응력-변형률 곡선과 잘 일치하였다. 그러나 SA312 TP316 상온의 경우는 모든 곡선 적합 결과가 실제 실험결과와 큰 차이를 보였다.

Ramberg-Osgood 상수가 결정되면, GE/EPRI 법을 이용하여 *J*-적분과 COD 를 예측하며 굽힘 모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 경우는 다음의 식과 같다.

Table 1 Material properties for the analyses

	TP304 (50℃)	TP316 (288 ℃)	TP316 (20℃)
E (GPa)	204	190	206
s_y (MPa)	269	165	234
s_u (MPa)	559	455	545
n	0.3	0.3	0.3

Table 2 Ramberg-Osgood curve-fitting results

	TP304 (50℃)		TP316 (288 ℃)		TP316 (20℃)	
	a	n	a	n	a	n
Entire curve (Fit A)	7.33	3.52	8.42	2.92	10.23	2.96
Up to 5% (Fit B)	5.97	4.30	5.76	4.11	3.39	4.72
0.1%-0.8 e_u (Fit C)	4.22	4.72	6.26	3.46	4.77	3.82

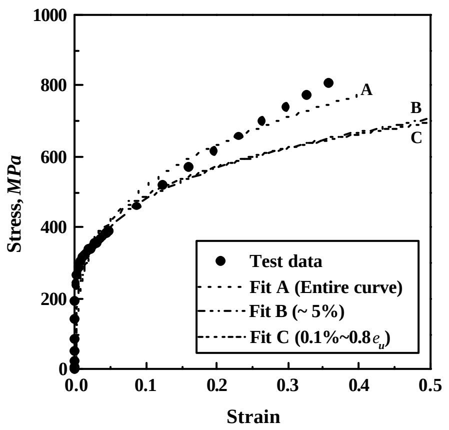

Fig. 2 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP304 (50℃)

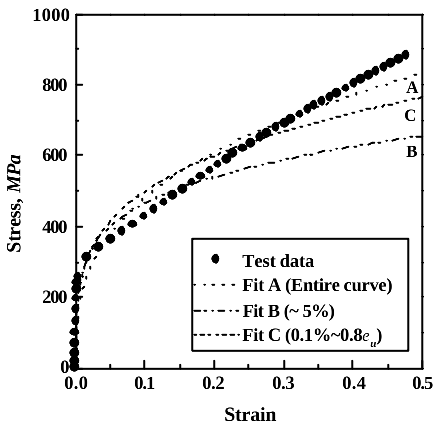

Fig. 4 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP316 (20℃)

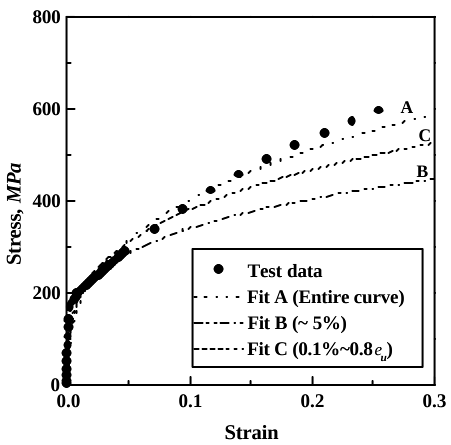

Fig. 3 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP316 (288℃)

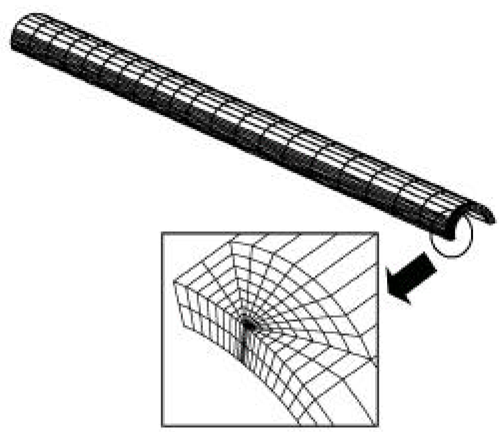

Fig. 5 A 3-D FE mesh for the circumferentially through-wall cracked pipe

Table 3 Summary of pipe test data

Loading	Test No.	Material	D_o (*mm*)	*t* (*mm*)	R_m/t	*q/p*	Temp. (°*C*)
Pure Bending	GE/1/B	304 SS	114.3	8.6	6.12	0.25	20
	GE/3/B	304 SS	114.3	8.6	6.12	0.5	20
	NRC/4111/1	A333 Gr. 6	114.3	8.9	5.93	0.37	288
	4.3-1*	STS-49	763.5	38.2	9.5	0.166	300
	3.3-1*	STS-410	166.0	14.5	5.22	0.166	300
Tension	GE/3/90/T	304 SS	114.3	8.6	6.12	0.25	20
Pressure	4121-1*	304 SS	168.1	12.9	6.02	0.386	288

* These data are extracted from (ref. 14). All other data are from (ref. 3).

$$J = \frac{K^2(a_e)}{E'} + a s_o e_o R_m (p - q)\frac{q}{p} \cdot h_1 \cdot \left[\frac{M}{M_o}\right]^{n+1} \quad (16)$$

$$d = \frac{4Ma_e}{pR_m^2 tE} \cdot V_1(a_e) + ae_o a \cdot h_2 \cdot \left[\frac{M}{M_o}\right]^n \quad (17)$$

식 (16)과 식 (17)에서 K는 선형탄성파괴역학 매개변수인 응력확대계수(stress intensity factor)이며, M은 작용 모멘트, 그리고 M_o는 다음과 같이 정의되는 기준 모멘트이다.

$$M_o = 4s_o R_m^2 t\left[cos\left(\frac{q}{2}\right) - \frac{1}{2}sinq\right] \quad (18)$$

식 (16)과 식 (17)에서 정의된 무차원 함수 V_1과 소성 영향 함수 h_1, h_2는 유한요소해를 바탕으로 정의된 것으로서, 배관과 균열의 기하학적 형상 및 가공경화지수에 따라 정의되어 있다[1,5]. 또한 J-적분과 COD값의 탄성 성분을 산출하기 위해서는 다음과 같이 정의되는 유효균열길이(effective crack length)를 사용하여 소성역에 의한 영향을 보정해주어야 한다.

$$a_e = a + \frac{1}{bp}\left(\frac{n-1}{n+1}\right)\left[\frac{K(a)}{s_o}\right]^2\left[1 + \left(\frac{M}{M_o}\right)^2\right]^{-1} \quad (19)$$

여기서, 평면 응력 조건인 경우에는 b=2이며, 평면 변형률 조건인 경우에는 b=6으로 정의된다. 순수 굽힘 모멘트나 인장 하중이 작용하는 관통균열이 존재하는 원자력발전소 배관의 경우는 평면 응력 조건이 지배적이기 때문에 본 연구에서는 b=2를 사용하여 유효균열길이를 산출하였다[5].

4. 해석결과

4.1 배관 실험 결과와의 비교

본 논문에서 제안한 COD 평가식의 타당성을 입증하기 위해서 기존에 수행된 배관 실험결과[3,14]와 비교하였으며 이를 정리하여 Table 3에 나타내었다. Fig. 6~Fig. 12는 실험에서 구한 COD값과 공학적 평가식으로 예측한 COD 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선으로 표시된 것은 재료의 실제 응력-변형률 곡선을 사용하여 식 (7)의 옵션 2 평가식으로

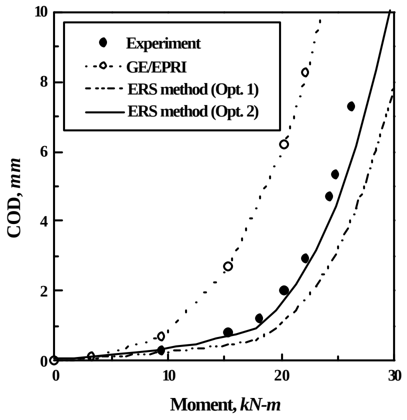

Fig. 6 Comparison of the COD predictions with pipe test data (GE/1/B, See Table 3)

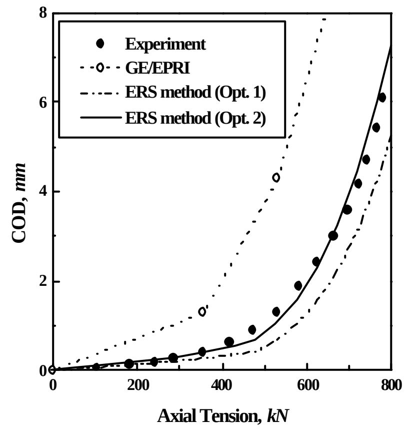

Fig. 9 Comparison of the COD predictions with pipe test data (GE/3/90/T, See Table 3)

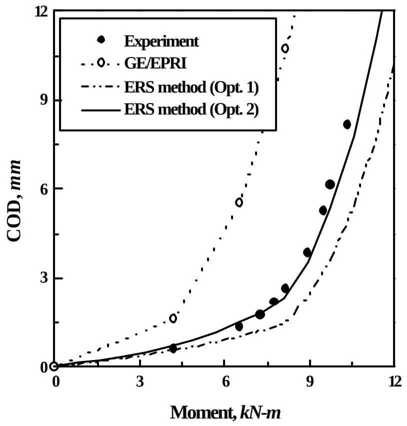

Fig. 7 Comparison of the COD predictions with pipe test data (GE3/B, See Table 3)

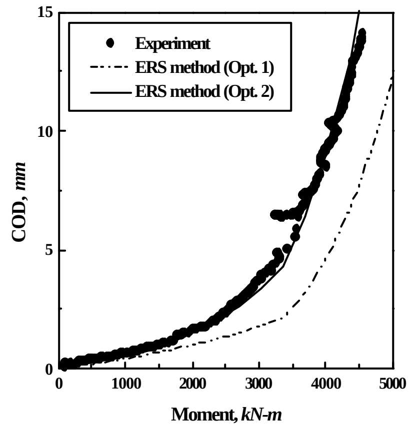

Fig. 10 Comparison of the COD predictions with pipe test data (4.3-1, See Table 3)

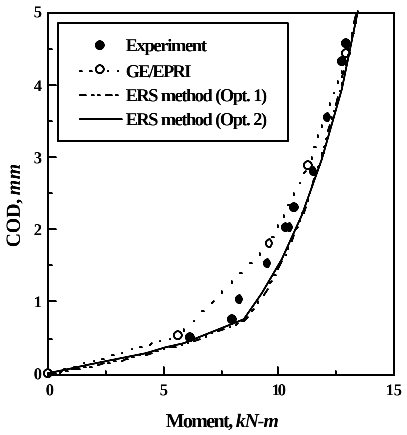

Fig. 8 Comparison of the COD predictions with pipe test data (NRC/4111/1, See Table 3)

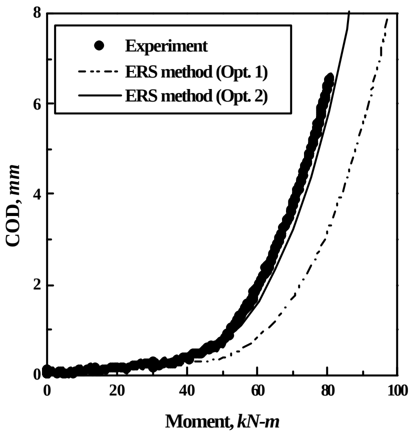

Fig. 11 Comparison of the COD predictions with pipe test data (3.3-1, See Table 3)

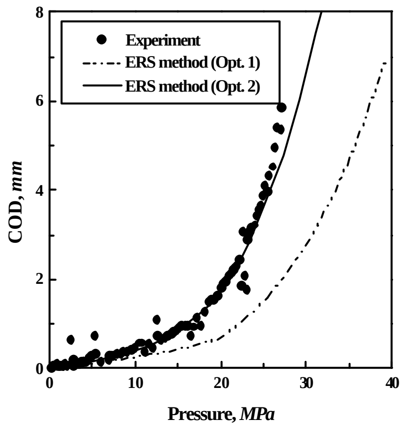

Fig. 12 Comparison of the COD predictions with pipe test data (4121-1, See Table 3)

예측된 결과이며, 점선으로 표시된 것은 재료의 항복 강도와 인장 강도만 알고 있다고 가정하여 식 (10)의 옵션 1 평가식으로 예측한 결과이다. 또한 GE/EPRI 법으로 예측한 결과는 "○"로 표시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 ERS 법으로 COD 를 예측한 경우에는 옵션 1 을 사용한 경우가 옵션 2 를 사용한 경우보다 항상 보수적이었다. 또한 Fig. 6~Fig. 9에 나타난 바와 같이 GE/EPRI 법으로 예측된 결과는 실험 결과와 큰 차이를 보였으나 ERS 법의 옵션 2 평가식으로 구한 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다.

4.2 유한요소해석 및 GE/EPRI 법과의 비교

Fig. 13~Fig. 20 은 유한요소해석으로 구한 *J*-적분과 COD 값을 ERS 법과 GE/EPRI 법으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 균열 길이(2 가지)와 재료 물성치(3 가지)를 고려하여 전체 6 가지 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. SA312 TP316 의 경우는 두가지 온도에서 결과의 경향이 비슷하여 본 논문에서는 지면 관계상 SA312 TP304(50℃)와 SA312 TP316(20℃)의 결과만을 비교하였다. 앞서 언급한 바와 같이 유한요소해석은 실제 응력-변형률 곡선을 이용하여 수행하였으며, ERS 법도 실제 응력-변형률 곡선을 사용하여 옵션 2 식으로 해석을 수행하였다. GE/EPRI 법으로 계산하는 경우에는 Table 2 에 나타낸 바와 같이 곡선 적합 구간을 변화시키며 구한 각각의 Ramberg-Osgood 상수를 이용하여 *J*-적분과 COD 값을 예측하였다.

해석 결과, GE/EPRI 법은 응력-변형률 곡선에 대한 곡선 적합 구간 및 방법에 따라 Ramberg-Osgood 상수값이 크게 변화하였으며, 이로 인해 예측 결과도 크게 변화하였다. 이는 LBB 해석시 GE/EPRI 법을 이용하여 *J*-적분 및 COD 값을 예측하면 입력 조건으로 사용되는 재료 물성치 결정 방법에 따라 해석 결과가 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 또한 3 가지의 곡선 적합 구간 가운데 "Fit A"로 곡선 적합한 경우가 실제 응력-변형률 곡선과 잘 일치하였으나, *J*-적분 및 COD 값 예측시에는 "Fit A"의 결과를 사용한 경우가 유한요소해석 결과와 가장 큰 차이를 보였다. 뿐만 아니라 SA312 TP304 의 경우는 "Fit C"를 사용한 경우가 유한요소해석 결과와 가장 잘 일치하였고, SA312 TP316 의 경우는 "Fit B"를 사용한 경우가 유한요소해석 결과와 가장 잘 일치하였다. 따라서 GE/EPRI 법을 이용한 *J*-적분 및 COD 값 예측시 모든 경우에 가장 정확한 Ramberg-Osgood 곡선 적합 방법을 제시하는 것은 불가능하였다.

ERS 법으로 *J*-적분 및 COD 값을 예측한 결과는 모든 경우에 있어서 GE/EPRI 법으로 예측한 결과보다 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, 그 경향도 항상 일정하였다. 그러나 COD 예측 결과는 GE/EPRI 법과 ERS 법 모두 유한요소해석 결과와 비교하여 비보수적인

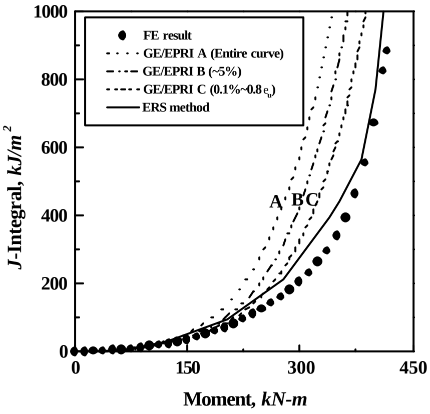

Fig. 13 Comparison of FE *J* values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP304 (50℃, q/p =0.4)

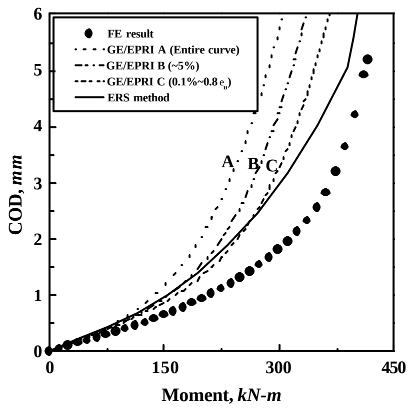

Fig. 14 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP304 (50℃, q/p =0.4)

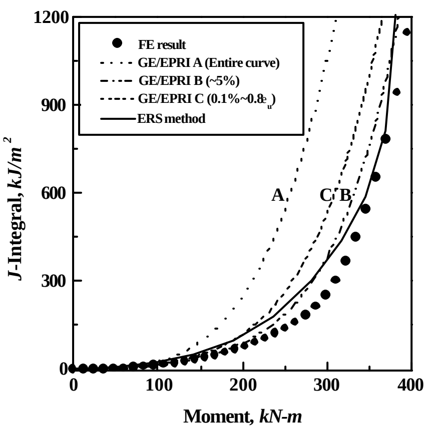

Fig. 15 Comparison of FE *J* values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP316 (20℃, q/p =0.4)

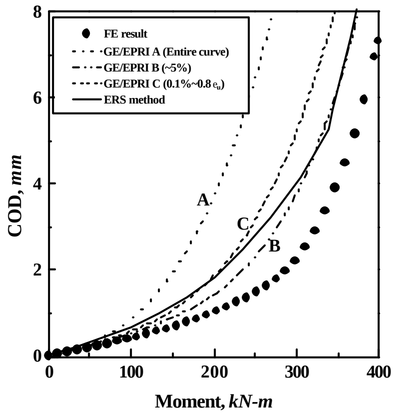

Fig. 16 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP316 (20℃, q/p =0.4)

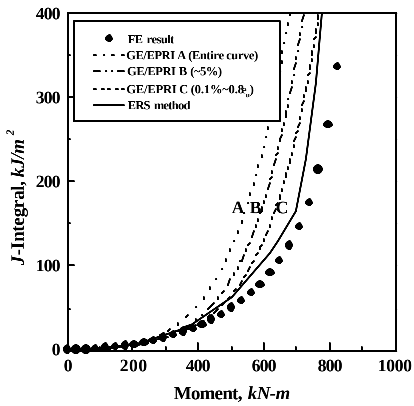

Fig. 17 Comparison of FE *J* values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP304 (50℃, q/p =0.125)

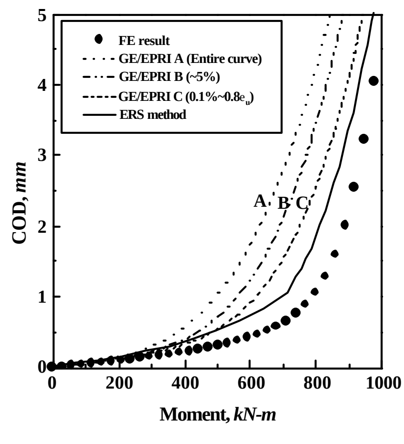

Fig. 18 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP304 (50℃, q/p =0.125)

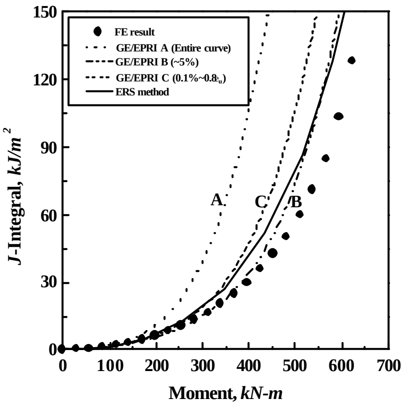

Fig. 19 Comparison of FE J values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP316 (20℃, q/p =0.125)

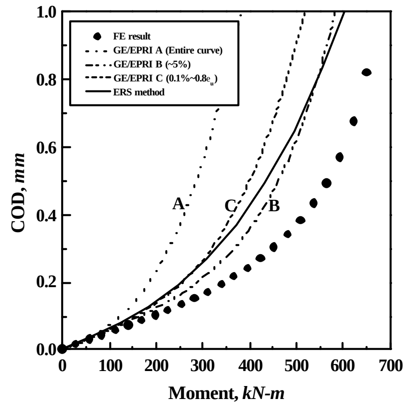

Fig. 20 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for SA312 TP316 (20℃, q/p =0.125)

것으로 나타났다. 하지만 앞서 기술한 바와 같이 ERS 법으로 예측한 COD 값은 배관 실험 결과와는 잘 일치하였다. 따라서 ERS 법으로 COD 값을 예측한 결과가 비보수적인 것은 유한요소해석을 이용한 COD 산출상의 문제로 생각되며 이에 대해서는 다음 절에 자세히 기술하였다.

5. 토 론

본 논문에서 제안한 ERS 법으로 예측한 COD 값은 실제 배관 실험 결과와 잘 일치하였다. 또한 3 차원 유한요소해석 및 GE/EPRI 법으로 예측한 결과와도 비교하였다. GE/EPRI 법으로 예측한 *J*-적분 및 COD 값은 Ramberg-Osgood 상수값에 따라 크게 변화하였다. 또한 해석 대상에 따라 예측 결과의 경향이 서로 다르게 나타나 가장 정확한 곡선 적합 방법을 제시하는 것이 불가능하였다. ERS 법으로 예측한 결과는 모든 경우에 있어서 GE/EPRI 법으로 예측한 결과보다 정확하였으며, 그 경향도 항상 일정하였다. 그러나 COD 예측 결과는 유한요소해석 결과와 비교하여 GE/EPRI 법과 ERS 법 모두 LBB 해석 측면에서 비보수적인 것으로 나타났다. 그러나 앞 절에서 기술한 바와 같이 ERS 법으로 예측한 COD 값은 실험 결과와 잘 일치하였다. 따라서 유한요소해석과 ERS 법으로 예측한 결과를 배관 실험 결과와 비교하여 경향을 비교하였다. 해석 대상은 외경과 두께가 각각 763.52*mm*, 38.18*mm* 인 원주방향 관통균열이 존재하는 배관에 대한 실험결과[14]이며, 재질은 STS-49 탄소강이다. 관통균열의 길이는 배관 원주의 16.6%(q/p =0.166)이다. 유한요소해석에는 실제 응력-변형률 곡선을 사용하여 소규모 변형률 해석과 대규모 변형률 해석(large strain analysis)을 모두 적용하였다. Fig. 21 은 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 유한요소해석시 소규모 변형률 조건으로 해석한 결과와 대규모 변형률 조건으로 해석한 결과는 서로 일치하였으며, 이는 해석 결과에 영향을 미치지 않았다. 또한 ERS 법으로 예측한 결과는 배관 실험 결과와 잘 일치하였으나 유한요소해석으로 예측한 결과는 배관 실험 결과보다 COD 값을 작게 예측하였다. 따라서 앞에서 ERS 법이 유한요소해석으로 구한 COD 값을 비보수적으로 예측한 것은 유한요소해석상의 문제로 판단되며, 유한요소해석이 COD 값을 작게 예측하는 것에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 본 논문에서 제안하는 ERS 법을 LBB 해석에 적용할 수 있음을 확인하였으며, 향후에는 크립 등의 다양한 문제에 ERS 법을 확대 적용할 예정이다.

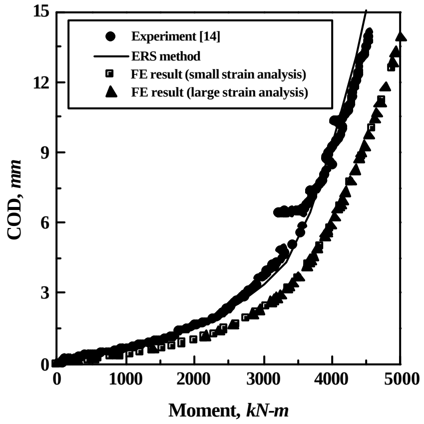

Fig. 21 Comparison of FE COD values with published pipe test data. For the FE COD results, two different options are also compared, small geometry change and large deformation options

6. 결 론

본 논문에서는 인장 하중과 굽힘 모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 *J*-적분과 COD 를 정확하게 예측할 수 있는 평가식을 제안하였다. 또한 제안된 평가식의 타당성을 입증하기 위해서 배관 실험 결과와 유한요소해석 및 GE/EPRI 법으로 예측한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) ERS 법으로 예측한 COD 값은 실제 배관 실험 결과와 잘 일치하였다.

(2) GE/EPRI 법으로 예측한 *J*-적분 및 COD 값은 Ramberg-Osgood 곡선 적합 구간에 민감하였다. 또한 해석 조건에 따른 결과의 경향이 일정하지 않아 가장 적절한 곡선 적합 방법을 제시하는 것은 불가능하였다.

(3) ERS 법으로 예측한 *J*-적분 및 COD 값은 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, GE/EPRI 법에 비해 결과가 안정적이다. 또한 곡선 적합을 수행하지 않으며, 평가식이 간단하기 때문에 GE/EPRI 법보다 사용이 편리하다는 장점도 있다.

(4) 향후 원자력발전소 배관에 대한 LBB 해석 및 균열 안정성 평가시 본 논문에서 제안한 ERS 법이 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] Kumar, V. and German, M.D., 1988, “Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders,” EPRI Report NP-5596.

[2] Ainsworth, R.A., 1984, “The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, pp. 633-642.

[3] Kishida, K. and Zahoor, A., 1988, “Crack Opening Area Calculations for Circumferential Through-

Wall Pipe Cracks," EPRI Special Report NP-5959-SR.
[4] 1999, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 3, British Energy Generation Ltd.
[5] 1995, "Refinement and Evaluation of Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes," NUREG/CR-6300, USNRC.
[6] Miller, A.G. and Ainsworth, R.A., 1989, "Consistency of Numerical Results for Power-Law Hardening Materials and the Accuracy of the Reference Stress Approximation for J," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32, pp. 237-247.
[7] Kim, Y.J., 1999, "Reference Stress Approximations for J and COD of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes," EPD/GEN/REP/0462/99, British Energy Generation Ltd.
[8] Kastner, W., Röhrich, E., Schmitt, W. and Steinbuch, R., 1981, International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 197-219.
[9] Wüthrich, C., 1983, "Crack Opening Areas in Pressure Vessels and Pipes," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, pp. 1049-1057.
[10] 1999, "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.
[11] Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," EPRI NP 3596-SR.
[12] 1996, "Pipe System Experiments with Circumferential Cracks in Straight-Pipe Locations," NUREG/CR-6389, USNRC.
[13] 1997, "Computer Program to Calculate Ramberg-Osgood Parameters for a Stress-Strain Curve," Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 1, Battelle.
[14] 1997, "Pipe Fracture Test Data," Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 3, Battelle.