

원자력 배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증

허남수* · 김운재** · 김영진†
(2000년 10월 26일 접수, 2001년 1월 29일 심사완료)

Application of Enhanced Reference Stress Method to Nuclear Piping LBB Analysis : Finite Element Validation

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

Key Words : Crack Opening Displacement (균열개구변위), J -integral (J -적분), Leak-Before-Break (파단전누설), Enhanced Reference Stress Method (개선된 참조응력법)

Abstract

Three-dimensional, elastic-plastic finite element analyses for circumferential through-wall cracked pipes are performed using actual tensile data of stainless steels, for two purposes. The first one is to validate the recently-proposed enhanced reference stress (ERS) method to estimate the J -integral and COD for circumferential through-wall cracked pipes. The second one is to compare those results with the GE/EPRI estimations. It is found that the J -integral and COD estimations according to the GE/EPRI method can be very sensitive to how the stress-strain data are fitted using the Ramberg-Osgood relation. Moreover, no tendency can be found regarding the most appropriate fitting range for the Ramberg-Osgood fit. On the contrary, the J -integral and COD estimations based on the ERS method give more accurate results than the GE/EPRI estimation. The present results provide confidence in applying the proposed method to the Leak-Before-Break (LBB) analysis.

1. 서론

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 대개변수인 J -적분과 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)의 정확한 산출이 필수적이다.

저자들은 전보⁽¹⁾에서 현재 널리 사용되고 있는

GE/EPRI 법⁽²⁾ 등의 문제점을 개선하여 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J -적분과 COD 값을 보다 정확하게 계산할 수 있는 참조응력법(reference stress method)⁽³⁾을 기반으로 한 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법을 제안한 바 있다. 또한 ERS 법으로 계산한 COD 값을 실제 배관 실험에서 구한 데이터와 비교하여 COD 계산식의 타당성도 입증한 바도 있다. 그러나 J -적분의 경우는 실험으로 구할 수 없기 때문에 계산식만을 제시하고 타당성은 입증하지 않았다. 따라서 실제적인 설계 적용을 위해서는 J -적분 계산식의 타당성 입증에 수반되어야 하며, COD 계산식도 보다 다양한 사례해석을 통한 타당성의 입증에 필요하다고 판단된다.

본 논문의 목적은 전보⁽¹⁾에서 제안된 ERS 법을 기반으로 한 J -적분 및 COD 계산식의 타당성을 실제 응력-변형률 곡선을 사용하여 3 차원 유한요소해석으로 입증하는 것이다. 또한 원자력발전소

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

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

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

배관의 건전성 평가에 널리 사용되고 있는 공학적 계산식인 GE/EPRI^(2,4) 법으로 계산한 결과와도 비교하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 재료 물성치

유한요소해석에 사용된 재료는 국내 원자력발전소 배관의 재질로 사용되는 SA312 TP304 와 SA312 TP316 스테인리스강이다. SA312 TP304 스테인리스강의 경우에는 50°C 에서 수행된 실험 결과를 사용하였으며, SA312 TP316 스테인리스강인 경우에는 20°C 및 288°C 에서 수행된 실험결과를 사용하였다.⁽⁵⁾ Fig. 1~Fig. 3 에 각각의 재질에 대한 실제 응력-변형률 곡선을 나타내었으며, Table 1 에 재료 물성치를 정리하여 나타내었다.

2.2 해석대상

Fig. 4는 해석에 사용된 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 배관의 외경과 두께는 각각 355.6mm, 35.7mm 이며, R_m/t 값은 4.48이다. 관통균열의 길이는 배관 원주의 12.5%($\theta/\pi=0.125$)와 40%($\theta/\pi=0.4$)의 2가지 경우로 가정하여 해석을 수행하였다. 하중 조건은 순수 굽힘 모멘트만을 고려하였다.

2.3 유한요소모델

Fig. 5는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램⁽⁶⁾을 사용하였으며, 20절점 등계수 사각주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였다. 배관 모델에 사용된 요소의 수는 936개이며, 소규모 변형률 해석(small strain analysis)을 적용하였다.

유한요소해석은 2가지의 균열 길이에 대해 Fig. 1~Fig. 3에 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 계산하였다.

3. 공학적 계산식을 이용한 J -적분 및 COD 계산

본 장에서는 GE/EPRI 법과 ERS 법을 이용한 J -적분 및 COD 계산 방법에 대해 간단히 기술하였다.

3.1 GE/EPRI 법

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

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (1)$$

여기서, σ_o 는 기준 응력으로서 일반적으로 재료의 항복강도(yield strength)를 사용한다. ε_o 는 기준 변형률이며, 일반적으로 $\varepsilon_o = \sigma_o/E$ 이다.

본 논문에서는 Ramberg-Osgood 상수가 GE/EPRI 법을 이용한 계산 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해서 곡선 적합 구간을 3가지로 구분하였다. 첫 번째 경우는 전체 응력-변형률 곡선을 이용하여 곡선 적합을 수행하였으며(Fit A), 두 번째 경우는 5% 변형률까지의 응력-변형률 곡선을 이용하여 곡선 적합을 수행하였다(Fit B).⁽⁷⁾ 세 번째 경우는 0.1% 변형률부터 $0.8\varepsilon_u$ 까지의 구간을 이용하여 곡선 적합을 수행하였다(Fit C).⁽⁸⁾ 곡선 적합에는 미국 Battelle 연구소에서 개발한 ROFIT 프로그램⁽⁹⁾을 사용하였다. Fig. 1~Fig. 3에 곡선 적합 결과와 실제 응력-변형률 곡선을 비교하여 나타내었으며, 곡선 적합으로 구한 Ramberg-Osgood 상수를 Table 2에 정리하여 나타내었다. SA312 TP304강과 SA312 TP316강의 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 TP316강의 상온의 경우는 모든 곡선 적합 결과가 실제 실험 결과와 큰 차이를 보였다.

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

$$J = \frac{K^2(a_e)}{E} + \alpha \sigma_o \varepsilon_o R_m (\pi - \theta) \frac{\theta}{\pi} \cdot h_1 \cdot \left[\frac{M}{M_o} \right]^{n+1} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{4Ma_e}{\pi R_m^2 E} \cdot V_1(a_e) + \alpha \varepsilon_o a \cdot h_2 \cdot \left[\frac{M}{M_o} \right]^n \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에서 K 는 선형탄성파괴역학 매개변수인 응력확대계수(stress intensity factor)이며, M

Table 1 Material properties for the analyses

	TP304 (50°C)	TP316 (288°C)	TP316 (20°C)
E (GPa)	204	190	206
σ_y (MPa)	269	165	234
σ_u (MPa)	559	455	545
ν	0.3	0.3	0.3

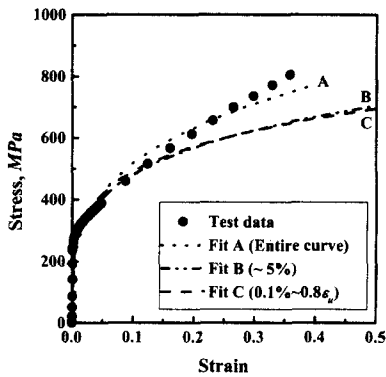


Fig. 1 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP304 steel (50°C)

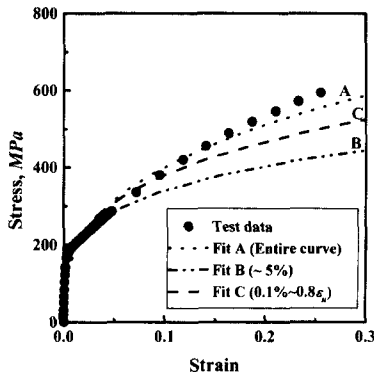


Fig. 2 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP316 steel (288°C)

은 작용 모멘트, 그리고 M_o 는 다음과 같이 정의되는 기준 모멘트이다.

$$M_o = 4\sigma_o R_m^2 t \left[\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{1}{2} \sin\theta \right] \quad (4)$$

식 (2)와 식 (3)에서 정의된 무차원 함수 V_i 과

Table 2 Ramberg-Osgood curve-fitting results

	TP304 (50°C)		TP316 (288°C)		TP316 (20°C)	
	α	n	α	n	α	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 ϵ_u (Fit C)	4.22	4.72	6.26	3.46	4.77	3.82

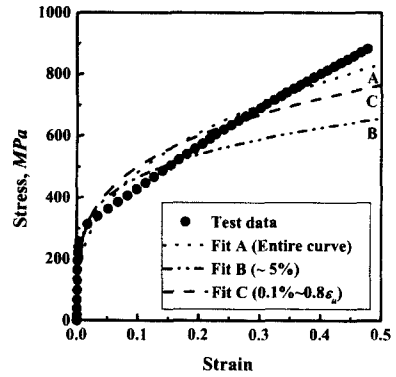


Fig. 3 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP316 steel (20°C)

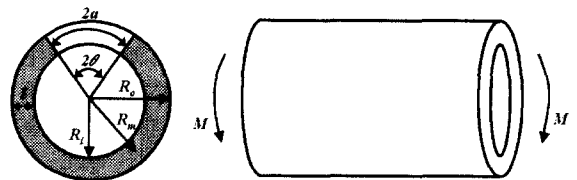


Fig. 4 Circumferential through-wall cracked pipes under pure bending

소성 영향 함수(plastic influence function) h_1, h_2 는 유한요소해를 바탕으로 정의된 것으로서, 배관과 균열의 기하학적 형상 및 가공경화지수에 따라 정의되어 있다.^(2,4) 또한 J -적분과 COD 값의 탄성 성분을 산출하기 위해서는 다음과 같이 정의되는 유효균열길이(effective crack length)를 사용하여 소성역에 의한 영향을 보정해주어야 한다.

$$a_e = a + \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left[\frac{K(a)}{\sigma_o} \right]^2 \left[1 + \left(\frac{M}{M_o} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

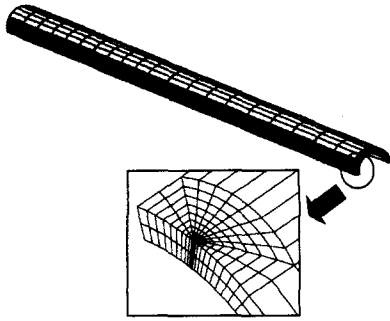


Fig. 5 A 3-D FE mesh for the circumferentially through-wall cracked pipe

여기서, 평면 응력 조건인 경우에는 $\beta = 2$ 이며, 평면 변형률 조건인 경우에는 $\beta = 6$ 으로 정의된다. 순수 굽힘 모멘트나 인장 하중이 작용하는 관통균열이 존재하는 원자력발전소 배관의 경우는 평면 응력 조건이 지배적이기 때문에 본 연구에서는 $\beta = 2$ 를 사용하여 유효균열길이를 산출하였다.⁽⁴⁾

3.2 ERS 법

ERS 법을 이용한 J -적분 및 COD 계산식은 배관 재료의 인장 특성 보유율에 따른 2 가지의 식으로 구성하였다.⁽¹⁾ 옵션 1 식은 배관 재료의 인장 특성 중에서 항복강도와 인장강도만을 보유하고 있을 경우에 사용하며, 재료의 실제 응력-변형률 곡선이 있으면 옵션 2 식을 사용하여 J -적분 및 COD 값을 계산한다. 옵션 1 식을 사용한 LBB 해석결과가 옵션 2 식을 사용한 결과보다 항상 보수적이다. 본 논문에서는 배관 재료의 실제 응력-변형률 곡선을 사용하여 옵션 2 식으로 J -적분과 COD 값을 산출하였다. 저자들이 제시한 J -적분 및 COD 계산식의 자세한 내용은 전보⁽¹⁾에 기술되어 있으며 본 논문에서 사용한 옵션 2 의 J -적분 계산식을 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \quad (6)$$

여기서, J_e 는 J -적분의 탄성 성분이며 ε_{ref} 는 참조응력(σ_{ref})에서 정의되는 변형률이다. L_r 은 소성분과 또는 소성역의 성장 정도를 나타내는 매개 변수로 다음과 같이 정의된다.

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_y = P / P_o^* = M / M_o^* \quad (7)$$

여기서, P_o^* 와 M_o^* 는 전보⁽¹⁾에서 새롭게 제시한 최적참조하중으로 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 한계 하중(P_L)과 한계 모멘트(M_L)로부터 다음과 같이 정의된다.

$$P_o^* = \gamma(\theta)P_L \quad ; \quad M_o^* = \gamma(\theta)M_L \quad (8)$$

$$\gamma(\theta) = 0.82 + 0.75 \left(\frac{\theta}{\pi} \right) + 0.42 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^2 \quad \text{for } \theta/\pi \leq 0.5 \quad (9)$$

옵션 2 의 COD 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{\delta}{\delta_e} = \begin{cases} \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} & \text{for } 0 \leq L_r \leq 1 \\ \left(\frac{\delta}{\delta_e} \right)_{L_r=1} (L_r)^{n_1} & \text{for } 1 < L_r \end{cases} \quad (10)$$

여기서, δ_e 는 COD 의 탄성 성분이며 $(\delta/\delta_e)_{L_r=1}$ 은 $L_r = 1$ 에서 정의되는 (δ/δ_e) 를 의미한다. 식 (10) 에서 가공경화지수 n_1 은 다음의 식으로부터 구한다.

$$n_1 = \frac{\ln[(\varepsilon_{u,t} - \sigma_{u,t}/E)/0.002]}{\ln[\sigma_{u,t}/\sigma_y]} \quad (11)$$

여기서, $\sigma_{u,t}$ 와 $\varepsilon_{u,t}$ 는 진인장강도(true tensile strength) 와 그때의 변형률을 의미한다.

4. 해석결과 및 토의

4.1 해석결과

Fig. 6~Fig. 13 은 유한요소해석으로 구한 J -적분과 COD 값을 ERS 법과 GE/EPRI 법으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 균열 길이(2개)와 재료 물성치(3개)를 고려하여 전체 6가지 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였다. SA312 TP316강의 경우는 2개 온도에서 결과의 경향이 비슷하여 본 논문에서는 지면 관계상 SA312 TP304강(50°C)과 SA312 TP316강(20°C)의 결과만을 비교하였다. 앞서 언급한 바와 같이 유한요소해석은 실제 응력-변형률 곡선을 이용하여 수행하였으며, ERS 법도 실제 응력-변형률 곡선을 사용하여 옵션 2 식으로 계산을 수행하였다. GE/EPRI 법으로 계산하는 경우에는 Table 2 에 나타낸 바와 같이 곡선 적합 구간을 변화시키며 구한 Ramberg-Osgood 상수를 이용하여 J -적분과 COD 값을 계산하였다.

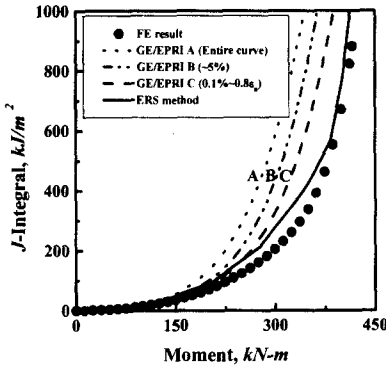


Fig. 6 Comparison of FE J values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP304 steel (50°C , $\theta/\pi=0.4$)

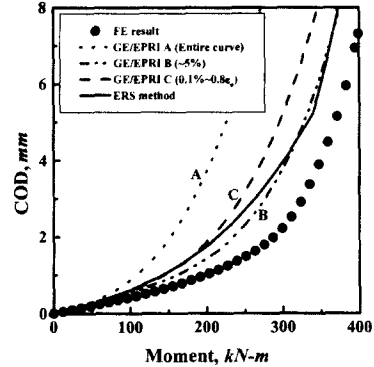


Fig. 9 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP316 steel (20°C , $\theta/\pi=0.4$)

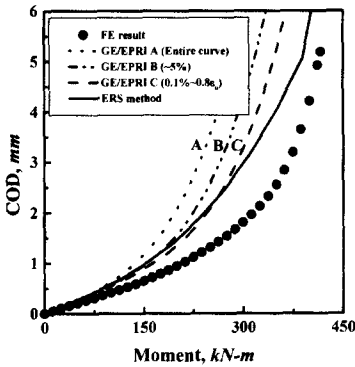


Fig. 7 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP304 steel (50°C , $\theta/\pi=0.4$)

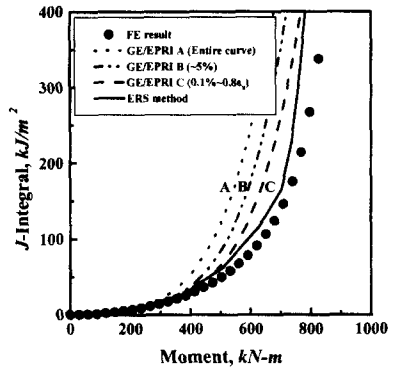


Fig. 10 Comparison of FE J values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP304 steel (50°C , $\theta/\pi=0.125$)

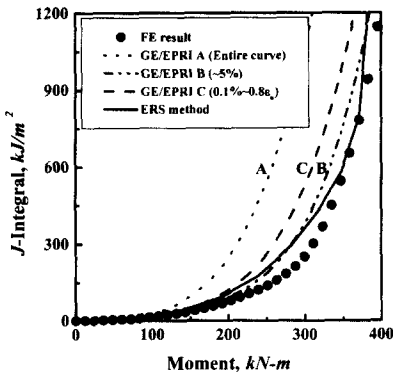


Fig. 8 Comparison of FE J values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP316 steel (20°C , $\theta/\pi=0.4$)

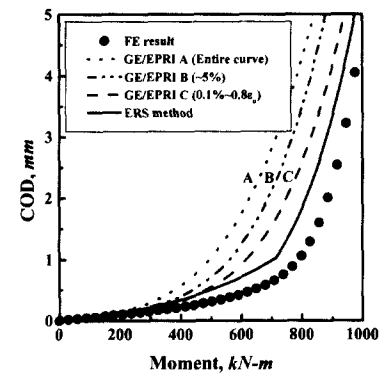


Fig. 11 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP304 steel (50°C , $\theta/\pi=0.125$)

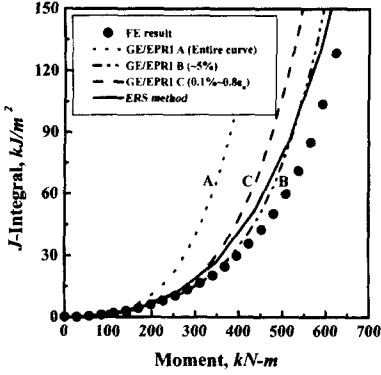


Fig. 12 Comparison of FE J values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP316 steel (20°C , $\theta/\pi=0.125$)

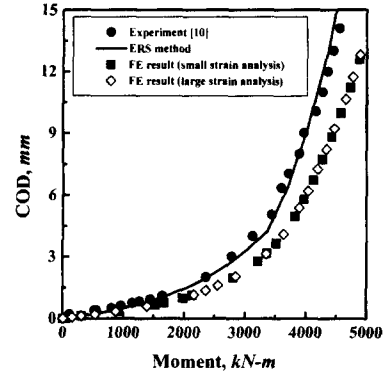


Fig. 14 Comparison of FE COD values with published pipe test data. For the FE COD results, two different options are also compared, small geometry change and large deformation options

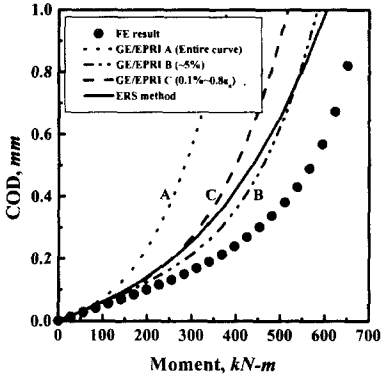


Fig. 13 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation schemes for SA312 TP316 steel (20°C , $\theta/\pi=0.125$)

해석 결과, 이미 알려진 바와 같이 GE/EPRI 법은 응력-변형을 곡선에 대한 곡선 적합 구간 및 방법에 따라 Ramberg-Osgood 상수값이 크게 변화하였으며, 이로 인해 계산 결과도 크게 변화하였다. 이는 LBB 해석시 GE/EPRI 법을 이용하여 J -적분과 COD 값을 계산하면 입력 조건으로 사용되는 재료 물성치 결정 방법에 따라 해석 결과가 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 또한 3가지의 곡선 적합 구간 가운데 “Fit A”로 곡선 적합한 경우가 실제 응력-변형을 곡선과 잘 일치하였으나, J -적분 및 COD 값 계산시에는 “Fit A”의 결과를 사용한 경우가 유한요소해석 결과와 가장 큰 차이를 보였다. 뿐만 아니라 SA312 TP304강의 경우는 “Fit C”를 사용한 경우가 유한요소해석 결과와 가장 잘 일치하였고, SA312 TP316강의 경우는 “Fit B”를

사용한 경우가 유한요소해석 결과와 가장 잘 일치하였다. 따라서 GE/EPRI 법을 이용한 J -적분 및 COD 값 계산시 모든 경우에 가장 정확한 Ramberg-Osgood 곡선 적합 방법을 제시하는 것은 불가능하다고 생각된다.

ERS 법으로 J -적분과 COD 값을 계산한 결과는 모든 경우에 있어서 GE/EPRI 법으로 계산한 결과보다 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, 그 경향도 항상 일정하였다.

4.2 토의

GE/EPRI 법을 이용하여 계산한 J -적분 및 COD 값은 Ramberg-Osgood 상수값에 따라 크게 변화하였다. 또한 해석 대상에 따라 계산 결과의 경향이 서로 다르게 나타나 가장 정확한 곡선 적합 방법을 제시하는 것이 불가능하였다.

ERS 법으로 계산한 결과는 모든 경우에 있어서 GE/EPRI 법으로 계산한 결과보다 정확하였으며, 그 경향도 항상 일정하였다. 그러나 COD 계산 결과는 GE/EPRI 법과 ERS 법 모두 LBB 해석 측면에서 비보수적인 것으로 나타났다. 전보⁽¹⁾에서는 ERS 법으로 계산한 COD 값이 실험 결과와 잘 일치하였다. 따라서 유한요소해석과 ERS 법으로 계산한 결과를 배관 실험 결과와 비교하여 경향을 비교하였다. 해석 대상은 외경과 두께가 각각 763.52mm, 38.18mm 인 원주방향 관통균열이 존재하는 배관에 대한 실험결과⁽¹⁰⁾이며, 재질은 STS-49 탄소강이다. 관통균열의 길이는 배관 원주의 16.6%($\theta/\pi = 0.166$)이다. 유한요소해석시에는 실제 응력-변형을 곡선을 사용하여 소규모 변형을 해석

과 대규모 변형을 해석(large strain analysis)을 모두 적용하였다. Fig. 14는 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 유한요소해석시 소규모 변형을 조건으로 해석한 결과와 대규모 변형을 조건으로 해석한 결과는 서로 일치하였으며, 이는 해석 결과에 영향을 미치지 않았다. 또한 ERS 법으로 계산한 결과는 배관 실험 결과와 잘 일치하였으나 유한요소해석으로 계산한 결과는 배관 실험 결과보다 COD 값을 작게 계산하였다. 기존의 연구에서도 3차원 유한요소해석으로 구한 J -적분과 COD 값이 실제 배관에 존재하는 균열의 파괴 거동을 가장 정확하게 예측하지만, COD 값의 경우는 배관 실험 결과와 차이를 보일 수 있다는 것이 알려진 바 있다.^(11,12) 따라서 3차원 유한요소해석으로 구한 COD 값이 배관 실험 결과와 차이를 보이는 원인에 대해서는 향후 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각되며, ERS 법으로 구한 COD 값이 3차원 유한요소해석으로 구한 결과보다 비보수적인 것이 ERS 법의 문제는 아니라고 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 ERS 법을 이용한 LBB 해석의 타당성을 입증하기 위해서 ERS 법으로 계산한 J -적분과 COD 값을 3 차원 유한요소해석 및 GE/EPRI 법으로 계산한 결과와 비교하였다.

해석 결과, 이미 알려진 바와 같이 GE/EPRI 법으로 계산한 J -적분 및 COD 값은 Ramberg-Osgood 곡선 적합 구간에 민감하였다. 또한 Ramberg-Osgood 곡선 적합 구간에 따른 계산 결과의 경향이 일정하지 않아 가장 적절한 곡선 적합 방법을 제시하는 것은 불가능하였다. 이에 반해, ERS 법으로 계산한 J -적분 및 COD 값은 GE/EPRI 법에 비해 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, 계산 결과도 안정적이다. 또한 곡선 적합을 수행하지 않으며, 평가식이 간단하기 때문에 GE/EPRI 법보다 사용이 편리하다는 장점도 있다.

이상의 결과로부터 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) 김윤재, 허남수, 김영진, 2000, "원주방향 관통 균열이 존재하는 배관의 J -적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식," 대한기계학회 논문집 A 권, 제 25 권, 제 3 호, pp. 548~553.
- (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) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
- (4) 1995, "Refinement and Evaluation of Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes," NUREG/CR-6300, USNRC.
- (5) 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.
- (6) 1999, "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.
- (7) Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," EPRI NP 3596-SR.
- (8) 1996, "Pipe System Experiments with Circumferential Cracks in Straight-Pipe Locations," NUREG/CR-6389, USNRC.
- (9) 1997, "Computer Program to Calculate Ramberg-Osgood Parameters for a Stress-Strain Curve," Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 1, Battelle.
- (10) 1997, "Pipe Fracture Test Data," Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 3, Battelle.
- (11) 1997, "International Piping Integrity Research Group (IPIRG) Program - Final Report," NUREG/CR-6233, USNRC.
- (12) 1997, "The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program - Final Report," NUREG/CR-6452, USNRC.