

# 복합하중이 작용하는 원자력 배관의 파단전누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증

허남수\*, 김윤재\*, 김영진\*

## Application of Enhanced Reference Stress Method to Nuclear Piping LBB Analysis under Combined Tension and Bending

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

### ABSTRACT

Three dimensional, elastic-plastic finite element (FE) analyses for circumferential through-wall cracked pipes under combined tension and bending are performed using actual tensile data of stainless steel, 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 under combined tension and bending. The second one is to compare those results with the GE/EPRI estimations. The FE results of the  $J$ -integral and the COD, resulting from six cases of proportional and non-proportional combined tension and bending, compare very well with those estimated from the proposed method. Excellent agreements of the proposed method with the detailed FE results provide sufficient confidence in the use of the proposed method to the Leak-Before-Break (LBB) analysis of through-wall cracked pipes under combined tension and bending.

**Key Words :** Circumferential Through-Wall Crack (원주방향 관통균열), Crack Opening Displacement (균열개구변위), Enhanced Reference Stress Method (개선된 참조응력법),  $J$ -integral ( $J$ -적분), Leak-Before-Break (파단전누설)

### 1. 서론

원자력발전소 배관의 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 해석을 위한 기본 요소는 정상 운전 하중 하에서의 감지가 가능한 누설균열(detectable leakage crack)길이의 산출과 그 균열이 LBB 적용이 가능한 안전 여유도(safety margin)를 가지고 있음을 파괴역학적 평가를 통해 입증하는 것이다. 이와 같은 해석시  $J$ -적분과 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)가 사용되므로 신뢰성 있는 LBB 해석을 위해서는  $J$ -적분과 COD를 정확

하게 계산하는 것이 필수적이다.

일반적으로 원자력발전소 배관에는 정상운전 하중에 해당하는 내압(인장하중)과 굽힘모멘트가 동시에 작용한다. 따라서 정확한 LBB 해석을 위해서는 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대한  $J$ -적분 및 COD 계산식이 사용되어야 한다. 그러나 GE/EPRI법<sup>(1,2)</sup>과 같은 기존의 공학적 계산식(engineering estimation scheme)은 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 가장 실제적인 하중 조건에 대해서는 제대로 계산식이 제시되어 있지 않아 적용이 불가능한 실정이다. LBB 해석에

2000년 12월 8일 접수  
\* 성균관대학교 기계공학부

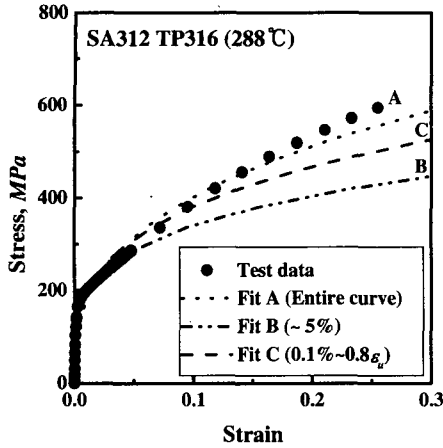


Fig. 1 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP316 stainless steel

사용되고 있는 PICEP 프로그램<sup>(3)</sup>이나 NRCPIPE 프로그램<sup>(4)</sup> 등에서도 GE/EPRI법 등의 기존의 공학적 계산식을 사용하여 단순히 인장하중의 결과와 굽힘모멘트의 결과를 더하여  $J$ -적분과 COD를 계산하기 때문에 결과가 매우 부정확하다. 이는 LBB 해석시 과도한 안전 계수(safety factor)를 도입하게 되는 주요 원인이 되고 있으며, 이로 인해 LBB 개념의 확대 적용에 많은 어려움이 있는 실정이다. 따라서 원자력발전소 배관의 실제적인 하중 조건을 고려할 수 있는 새로운 공학적 계산식이 필요하다.

저자들은 최근 단순 인장하중이나 굽힘모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열(circumferential through-wall crack)이 존재하는 배관에 대한 새로운 공학적 계산식인 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법을 제시하고, 실패관 실험 결과와 3차원 유한요소해석을 이용하여 타당성을 입증한 바 있다<sup>(5,6)</sup>. 또한 이를 확대 적용하여 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 배관의  $J$ -적분 및 COD 계산식을 제시하고 실패관 실험 결과와 비교하여 그 타당성을 입증한 바도 있다<sup>(7)</sup>. 그러나 실패관 실험 결과가 한정되어 있기 때문에 실제적인 설계 적용을 위해서는 보다 다양한 사례 해석을 통한 추가적인 타당성 입증이가 필요하다고 판단된다.

본 논문의 목적은 전보<sup>(7)</sup>에서 제시한 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 새로운 공학적  $J$ -적분 및

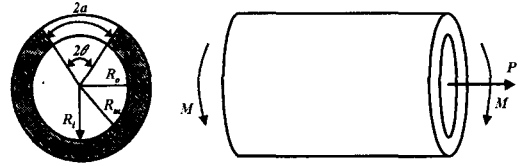


Fig. 2 Circumferential through-wall cracked pipe under combined tension and bending

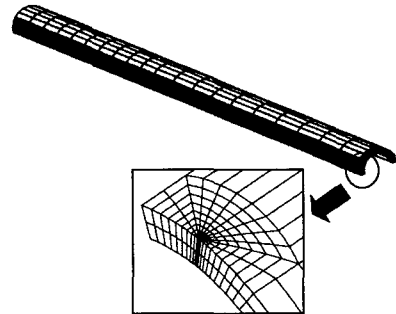


Fig. 3 3-D FE mesh for the circumferential through-wall cracked pipe

COD 계산식의 타당성을 실제 응력-변형률 곡선을 사용한 3차원 유한요소해석으로 입증하는 것이다. 또한 현재 규제기관의 인증 하에 LBB 해석시 널리 사용되고 있는 GE/EPRI법으로 계산한 결과와도 비교하고자 한다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 재료 물성치

유한요소해석에 사용된 재료는 국내 원자력발전소 배관의 재료로 사용되는 SA312 TP316 스테인레스강이다. Fig. 1은 해석에 사용된 실제 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 288°C에서 수행된 준정적(quasi static) 실험 결과이다. 항복 강도(yield strength)와 인장 강도(ultimate strength)는 각각 165MPa, 455MPa이며 탄성 계수(Young's modulus)는 190GPa이다.

### 2.2 해석대상

Fig. 2는 해석에 사용된 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 배관의 외경과 두께는 각각 355.6mm, 35.7mm이며,

Table 1 Summary of FE calculations for the present work

Loading condition	$\theta/\pi$	$P_a$ (MPa)	$\lambda = M/(P \cdot R_m)$
Proportional Loading	0.125	-	0.5 and 2.0
	0.4	-	0.5 and 2.0
Non-proportional Loading	0.125	17.5	-
	0.4	17.5	-

$R_m/t$ 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.

2.3 유한요소모델

Fig. 3은 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램<sup>(8)</sup>을 사용하였으며, 20절점 등계수 사각주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였다. 배관 모델에 사용된 요소의 수는 936개이며, 소규모 변형을 해석(small strain analysis)을 적용하였다.

인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우는 하중의 작용 상태에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫번째는 인장하중과 굽힘모멘트가 같은 비율로 동시에 작용하는 경우(proportional loading)로 이때 작용 하중비는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{M}{P \cdot R_m} \tag{1}$$

여기서,  $M$ 은 작용 모멘트이며,  $P$ 는 작용 하중, 그리고  $R_m$ 은 배관의 평균 반경이다.

두번째는 하나의 하중은 크기가 고정되어 있고(대부분의 경우 인장하중), 다른 하나의 하중만 증가하는 경우(non-proportional loading)이다. 본 논문에서는 위의 2가지 경우에 대해 모두 해석을 수행하였으며, 해석 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다. 첫번째 경우에 대해서는 각각의 균열 길이에 대해 Table 1에 나타낸 바와 같이  $\lambda$ 값을 0.5와

Table 2 Ramberg-Osgood curve-fitting results for SA312 TP316 stainless steel at 288°C

	$\alpha$	$n$
Entire curve (Fit A)	8.42	2.92
Up to 5% (Fit B)	5.76	4.11
0.1%~0.8 $\epsilon_u$ (Fit C)	6.26	3.46

2로 가정하여 해석을 수행하였으며, 두번째 경우에 대해서는 내압( $p_a$ )을 17.5MPa로 고정시키고 굽힘모멘트만을 증가시키며 해석을 수행하였다. 유한요소해석시에는 내압을 인장하중으로 환산하여 해석을 수행하였다.

3. 공학적 계산식을 이용한 J-적분 및 COD 계산

본 장에서는 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우, GE/EPRI법과 ERS법을 이용한 J-적분 및 COD 계산 방법에 대해 간단히 기술하였다.

3.1 GE/EPRI 법

GE/EPRI법을 이용하여 J-적분 및 COD를 계산하기 위해서는 재료의 응력-변형률 곡선에 대해 다음과 같이 Ramberg-Osgood 관계식으로 곡선 적합을 수행하여  $\alpha$ 와  $n$ 을 구해야 한다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \tag{2}$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 기준 응력으로서 일반적으로 재료의 항복 강도를 사용한다.  $\epsilon_0$ 는 기준 응력에서 정의되는 기준 변형률이다.

본 논문에서는 Ramberg-Osgood 상수가 GE/EPRI법을 이용한 계산 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% 변형률까지의 응력-변형률 곡선을 이용하여 곡선 적합을 수행하였다(Fit "B")<sup>(3)</sup>. 세번째 경우는 0.1% 변형률부터 0.8  $\epsilon_u$ 까지의 구간을

이용하여 곡선 적합을 수행하였다(Fit "C")<sup>(9)</sup>. 곡선 적합에는 미국 Battelle 연구소에서 개발한 ROFIT 프로그램<sup>(10)</sup>을 사용하였다. Fig. 1에 곡선 적합 결과를 실제 응력-변형률 곡선과 비교하여 나타내었으며, 곡선 적합으로 구한 Ramberg-Osgood 상수를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 곡선 적합 결과, 전체 응력-변형률 곡선을 이용한 경우가 실제 응력-변형률 곡선과 비교적 일치하였으며 나머지 경우는 높은 변형률 구간에서 큰 차이를 나타냈다.

Ramberg-Osgood 상수가 결정되면, GE/EPRI법을 이용하여  $J$ -적분과 COD를 계산한다.  $J$ -적분과 COD는 탄성 성분과 소성 성분을 더하여 구하며, 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 탄성 성분 산출식에 대해서는 전보<sup>(7)</sup>에 자세히 기술하였다. 소성 성분은 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$J_p = \alpha \sigma_o \epsilon_o R_m (\pi - \theta) \frac{\theta}{\pi} \cdot h_1 \cdot \left[ \frac{P}{P_o} \right]^{n+1} \quad (3)$$

$$\delta_p = \alpha \epsilon_o a \cdot h_2 \cdot \left[ \frac{P}{P_o} \right]^n \quad (4)$$

여기서,  $J_p$  와  $\delta_p$  는  $J$ -적분과 COD의 소성 성분을 의미하며,  $P$ 는 작용 하중을 의미한다. 또한  $P_o$  는 다음과 같이 정의되는 기준 하중이다.

$$P_o = \frac{1}{2} \left[ \frac{-\lambda P_o^2 R_m}{M_o} + \sqrt{\left( \frac{\lambda P_o^2 R_m}{M_o} \right)^2 + 4P_o^2} \right] \quad (5)$$

여기서,  $\lambda$ 는 식 (1)에서 정의된 작용 하중비이며,  $P_o$  와  $M_o$  는 다음과 같이 정의되는 순수 인장하중과 순수 굽힘모멘트에 대한 기준 하중과 기준 모멘트이다.

$$P_o = 2\sigma_o R_m t \left[ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left( \frac{1}{2} \sin \theta \right) \right] \quad (6)$$

$$M_o = 4\sigma_o R_m^2 t \left[ \cos \left( \frac{\theta}{2} \right) - \frac{1}{2} \sin \theta \right] \quad (7)$$

식 (3)과 식 (4)의 소성 영향 함수(plastic

influence function)  $h_1, h_2$ 는 유한요소해를 바탕으로 정의된 것으로서 배관과 균열의 기하학적 형상과 가공경화지수에 따라 정의되어 있다<sup>(1)</sup>.

그러나 GE/EPRI법은  $\theta/\pi$ 가 0.125와 0.25이고, 작용 하중비가 0.5, 1, 그리고 2인 경우에 대해서만 계산식이 제안되어 있기 때문에 사용이 제한적이다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 원자력발전소 배관의 경우는 일정 인장하중 하에서 굽힘모멘트가 작용하지만 GE/EPRI법은 이와 같은 경우에 대한 계산식이 제시되어 있지 않기 때문에 실제적인 LBB 해석에 적용이 불가능하다.

### 3.2 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법

ERS법을 이용한 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 배관의  $J$ -적분 및 COD 계산식은 앞서 언급한 하중 형태에 따라 2가지 경우로 구성되어 있다. GE/EPRI법과 달리 ERS법은 인장하중과 굽힘모멘트가 같은 비율로 동시에 작용하는 경우에도 적용 가능하며, 하나의 하중은 크기가 고정되고 다른 하나의 하중만 증가하는 경우에도 적용이 가능하다. 본 논문에서는 2가지 하중 조건 모두에 대해 ERS법으로  $J$ -적분과 COD를 계산하였다. ERS법을 이용한  $J$ -적분과 COD 계산식은 저자들이 발표한 전보<sup>(7)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

## 4. 해석결과 및 토의

### 4.1 해석결과

Fig. 4~Fig. 9는 인장하중과 굽힘모멘트가 같은 비율로 동시에 작용하는 경우에 대해 유한요소해석으로 구한  $J$ -적분과 COD를 ERS법과 GE/EPRI법으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 4~Fig. 5는  $\theta/\pi$ 가 0.4인 경우에 대한 해석 결과이며, Fig. 6~Fig. 9는  $\theta/\pi$ 가 0.125인 경우에 대한 해석 결과이다. GE/EPRI법은  $\theta/\pi$ 가 0.125와 0.25인 경우에 대해서만 해가 제시되어 있기 때문에  $\theta/\pi$ 가 0.4인 경우에는 ERS법으로 구한 결과만 나타내었다.

해석 결과에 나타낸 바와 같이 ERS법으로 구한  $J$ -적분과 COD는 모든 경우에 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 그러나 GE/EPRI법으로 구한  $J$ -적분과 COD는 유한요소해석 결과보다 크게 나타났다. 또한 곡선 적합 구간에 따라 Ramberg-Osgood 상수가 변화하였으며, 이로 인해 계산

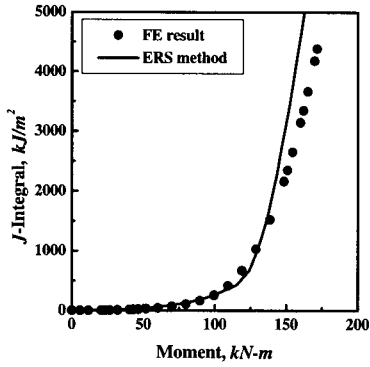


Fig. 4 Comparison of FE  $J$  values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.4$  under proportional loading ( $\lambda=0.5$ )

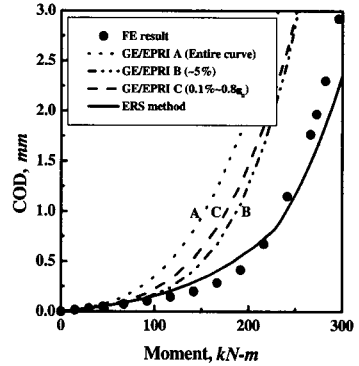


Fig. 7 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.125$  under proportional loading ( $\lambda=0.5$ )

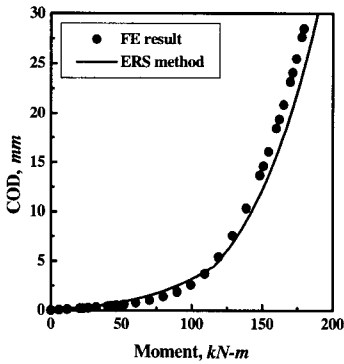


Fig. 5 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.4$  under proportional loading ( $\lambda=0.5$ )

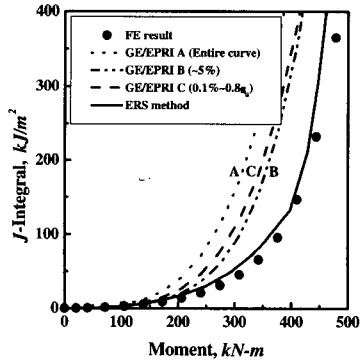


Fig. 8 Comparison of FE  $J$  values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.125$  under proportional loading ( $\lambda=2.0$ )

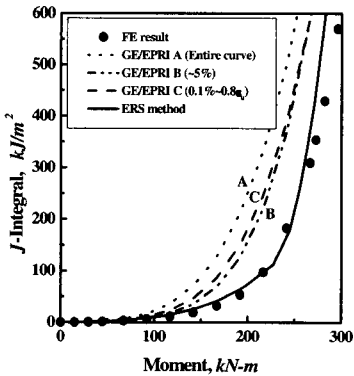


Fig. 6 Comparison of FE  $J$  values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.125$  under proportional loading ( $\lambda=0.5$ )

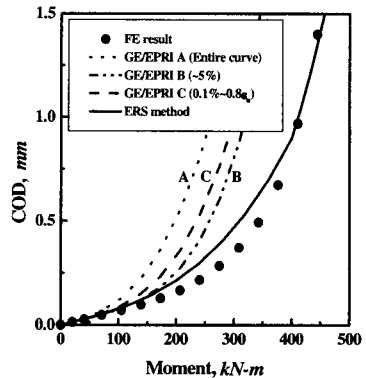


Fig. 9 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.125$  under proportional loading ( $\lambda=2.0$ )

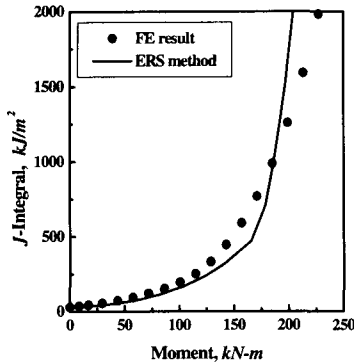


Fig. 10 Comparison of FE  $J$  values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.4$  under non-proportional loading

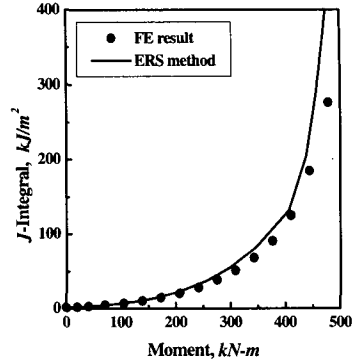


Fig. 12 Comparison of FE  $J$  values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.125$  under non-proportional loading

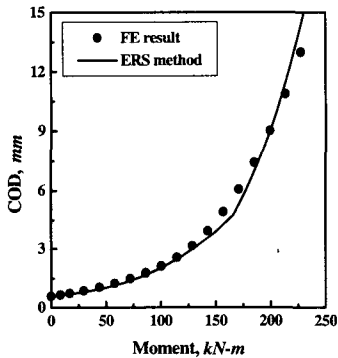


Fig. 11 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.4$  under non-proportional loading

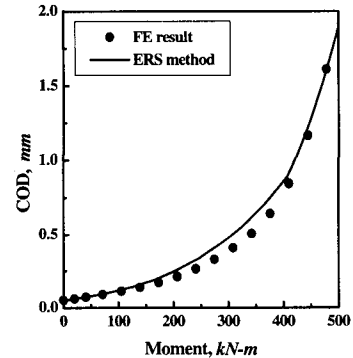


Fig. 13 Comparison of FE COD values with those from engineering estimation scheme for  $\theta/\pi=0.125$  under non-proportional loading

결과도 크게 변화하였다. 특히 곡선 적합 결과는 전체 응력-변형률을 사용한 경우(Fit "A")가 실제 응력-변형률 곡선과 잘 일치하였으나, GE/EPRI법을 이용한 계산 결과는 이 경우가 유한요소해석 결과와 가장 큰 차이를 나타냈다.

Fig. 10~Fig. 13은 내압은 일정 크기로 고정하고 굽힘모멘트만 증가시킨 경우에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 GE/EPRI법은 이 경우에 대한 계산식이 제시되어 있지 않기 때문에 ERS법으로 구한 결과만을 유한요소해석 결과와 비교하였다. 해석 결과, 새롭게 제시된 계산식으로 구한  $J$ -적분과 COD는 이 경우에도 유한요소해석 결과와 잘 일치하여 계산식의 타당성이 입증되었다.

#### 4.2 토의

GE/EPRI법으로 구한  $J$ -적분과 COD는 Ramberg-Osgood 상수값에 따라 크게 변화하였으며, 3차원 유한요소해석으로 구한 결과보다 크게 나타났다. 또한 인장하중과 굽힘모멘트가 같은 비율로 증가하는 경우에는 해가 제한적으로 제시되어 있으며 계산 절차가 복잡하기 때문에 실제 적용시 많은 문제가 있다. 뿐만 아니라 인장하중은 일정 크기로 고정되어 있고 굽힘모멘트만 증가하는 원자력발전소 배관의 가장 일반적인 하중 조건에 대해서는 계산식이 제시되어 있지 않아 실제 LBB 해석시 적용이 불가능하다.

이에 반해 ERS법은 인장하중과 굽힘모멘트가 같은 비율로 작용하는 경우에도 모든 작용 하중비

에 대해 적용이 가능하며, 3차원 유한요소해석 결과와도 잘 일치하였다. 또한 GE/EPRI법은 적용이 불가능한 일정 크기의 인장하중 하에서 굽힘모멘트만 증가하는 경우에도 적용이 가능하며 계산 결과도 3차원 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다.

이상의 결과로부터 본 논문에서 새롭게 제시하는 ERS법을 LBB 해석에 적용할 수 있음을 확인하였다.

### 5. 결론

본 논문에서는 새롭게 제시하는 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의  $J$ -적분 및 COD 계산식의 타당성을 입증하기 위해서 제시된 공학적 계산식으로 구한  $J$ -적분과 COD를 유한요소해석 및 GE/EPRI법으로 구한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) GE/EPRI법으로 계산한  $J$ -적분과 COD는 3차원 유한요소해석 결과와 큰 차이를 나타냈으며, 해석 결과가 Ramberg-Osgood 상수에 매우 민감하였다.

(2) ERS법으로 계산한  $J$ -적분과 COD는 3차원 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, GE/EPRI법에 비해 해석 결과가 안정적이다. 또한 곡선 적합을 수행하지 않으며 평가식이 간단하기 때문에 GE/EPRI법보다 사용이 편리하다는 장점도 있다.

(3) GE/EPRI법은 인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 경우에 대해서만 계산식이 제한적으로 제시되어 있으나 ERS법은 작용 하중비나 하중 형태에 관계없이 모든 경우에 적용될 수 있으며, 본 논문에서 고려된 모든 경우에 대해서 해석 결과가 매우 정확하였다.

### 후기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교

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

### 참고문헌

1. Kumar, V., and German, M.D., "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," EPRI NP-5596, 1988.
2. Rahman, S., Brust, F.W., Ghadiali, N., and Wilkowski, G., "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes - Part I : Analysis Models," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 357~373, 1998.
3. Norris, D.M., and Chexal, B., "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," EPRI NP-3596-SR, 1987.
4. "NRCPIPE Windows Version 3.0 User's Guide," Battelle, 1996.
5. 김윤재, 허남수, 김영진, "원주방향 관통균열이 존재하는 배관의  $J$ -적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제3호, pp. 548~553, 2001.
6. 허남수, 김윤재, 김영진, "원자력배관의 파단전 누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제4호, pp. 741~747, 2001.
7. 허남수, 김윤재, 김영진, "인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 새로운  $J$ -적분 및 COD 계산식," 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 7, 게재예정, 2001.
8. "ABAQUS User's Manual - Ver. 5.8," Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc., 1999.
9. "Pipe System Experiments with Circumferential Cracks in Straight-Pipe Locations," NUREG/CR-6389, USNRC, 1996.
10. "Computer Program to Calculate Ramberg-Osgood Parameters for a Stress-Strain Curve," Pipe Fracture Encyclopedia, Vol. 1, Battelle, 1997.