

# 비선형 파괴역학 해석을 위한 새로운 기법: 개선된 참조 응력법

김윤재 · 김영진\*

## New Engineering Method for Non-Linear Fracture Mechanics Analysis Enhanced Reference Stress Method

Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

**Key Words :**  $C^*$ -integral( $C^*$ -적분), Defect Assessment, Finite Element Analysis(유한요소해석),  $J$ -integral( $J$ -적분), Non-Linear Fracture Mechanics, Reference Stress Method(참조응력법)

### Abstract

This paper briefly describes the new engineering method, called the enhanced reference stress method, to estimate  $J$  (or  $C^*$ ) for non-linear fracture mechanics analysis of defective components, recently proposed by authors. The proposed method offers significant advantages over existing methods in terms of its accuracy, simplicity and robustness. Examples of application of the proposed method to typical piping integrity problems such as through-wall cracked pipes under combined loading, and surface cracked pipes under internal pressure and bending are given. Excellent agreements between the FE  $J$  and  $C^*$  results and those of the proposed method provide sufficient confidence in the use of the proposed method. One notable point is that the proposed method can be used to estimate  $J$  (or  $C^*$ ) along the crack front of surface cracks. Moreover simplicity of the proposed method makes it easy to extend to more complex problems. Thus the proposed method is attractive to assess the significance of defects under practical situations

### 1. 서론

1970년대 Rice<sup>(1)</sup>가 탄소성 파괴역학 매개변수인  $J$ -적분을 제시한 이후 비선형 파괴역학(Non-Linear Fracture Mechanics)는 급속하게 발전하였다. 특히 정립된 비선형 파괴역학을 균열 구조물의 안정성 평가에의 응용에 관련된 연구가 80년대부터 미국과 유럽을 중심으로 활발히 진행되어 왔다. 예로, 1980년대에 미국의 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)를 중심으로 균열 구조물의 비선형 파괴역학 해석을 위한 GE/EPRI Handbook<sup>(2)</sup>을 개발한 것을 필두로 영국에서는 중앙전력연구소(Central Electric Generating Board, CEGB)의 R6<sup>(6)</sup>

와 R7<sup>(7)</sup> 절차법들을 개발하였고, 최근 미국을 중심으로 국제공동연구로 배관건전성 평가연구<sup>(8,9)</sup>를 수행하였고, 유럽에서는 유럽공동체 균열구조물 절차법 SINTAP(Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry)<sup>(10)</sup>를 개발하였다. 이러한 근 20년 동안의 활발한 연구에도 불구하고 아직도 비선형 파괴역학의 균열 구조물에의 응용에는 많은 문제점들이 있다<sup>(11)</sup>.

본 논문에서는 저자들이 최근에 제안한 새로운 비선형 파괴역학 해석 방법인 개선된 참조 응력법에 대한 간략한 설명과 검증을 한다.

### 2. 기존의 방법들과 문제점

현재 세계적으로 비선형 파괴역학 매개변수 ( $J$ -적분과  $C^*$ -적분) 계산에 가장 널리 사용되고 있는 공학적 방법으로 크게 미국의 GE/EPRI 방법과 유럽의 참조응력방법(Reference stress method)을 들

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부  
E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr  
TEL : (031)290-7459 FAX : (031)290-5276

수 있다. 이들 방법들의 장 단점을 살펴보면 다음과 같다.

먼저 GE/EPRI방법의 기본 개념은  $J$ -적분 (혹은  $C^*$ -적분)의 소성 영향함수를 유한요소 해석에서 결정하는 것이며 따라서 이 방법의 장점은 그 정확성에 있다고 할 수 있다. 하지만 실제 문제들은 다양한 형상, 균열 크기 그리고 하중 형태임을 고려할 때, 이 방법을 실제 문제에 적용하기 위해선 엄청난 양의 3차원 유한요소 해석이 필요하다는 단점이 있다. 이런 맥락에서 현재까지 존재하는 해의 실제 적용은 상당한 한계가 있다. 다른 단점은 이 방법의 적용을 위해선 재료 인장특성(혹은 크리프-변형 특성)을 Ramberg-Osgood식 (혹은 멱급수식)으로 이상화 시켜야만 한다는 것으로서 이러한 이상화과정에서 또는 이상화하는 방법에서 생길 수 있는 오차로 인해 계산된  $J$ -적분 (혹은  $C^*$ -적분)은 상당한 오차를 가져올 수 있다는 것이다.

위에서 언급한 GE/EPRI방법의 단점을 보완하기 위해 Ainsworth<sup>(12)</sup>는 고온구조물 응력해석에서 오랫동안 사용되어 왔던 참조응력법<sup>(13)</sup>을 이용하여 균열구조물평가를 위한  $J$ -적분 (혹은  $C^*$ -적분) 계산식을 제안하였다. 이 방법의 기본 개념은 균열구조물의  $J$ -적분 (혹은  $C^*$ -적분)을 탄성성분의  $J$ -적분과 소성한계하중을 이용하여 구하는 것이다. 따라서 복잡한 형상과 하중형태에 대해서도 쉽게  $J$ -적분 (혹은  $C^*$ -적분)을 계산할 수 있어 실제 문제의 적용이 용이하다는 장점이 있다. 반면에 일반적으로 계산결과는 부정확하다고 알려져 있으며 특히 표면균열의 경우 균열구조물의 소성한계하중 정의가 모호해져 적용이 어렵다는 단점이 있다. 표면균열의 경우가 실제 가장 중요한 문제임을 감안할 때 이 방법의 실제 적용에는 많은 문제점이 있다고 할 수 있다.

현재 사용되고 있는 공학적 방법들을 실제 문제에 적용하기에는 많은 문제점들이 있다는 것을 위에서 기술하였다. 따라서 더욱 정확한 균열구조물 건전성평가를 위해서는 새로운 방법이 필요하며 이 방법은 다음과 같은 세가지 조건을 만족해야 할 것이다.

- Accuracy
- Robustness
- Simplicity (and Easiness to Extend)

이 세 가지의 요구 조건을 만족하는 방법으로 최근 저자들이 주장한 개선된 참조응력법에 대한 간략한 설명이 다음 장에 주어진다.

### 3. 개선된 참조 응력법

#### 3.1 공식화 (Formulation)

GE/EPRI방법의  $J$ -적분 계산식은 재료의 응력 ( $\sigma$ )-변형률( $\epsilon$ )이 다음과 같은 Ramberg-Osgood 식을 따른다는 가정에서 구하였다.

$$\left(\frac{\epsilon}{\sigma_y/E}\right) = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_y$ 는 재료의 항복 강도이며  $E$ 는 재료의 Young's Modulus이다. GE/EPRI법에서  $J$ -적분의 소성 성분은 일반적으로 다음과 같이 정의된다.<sup>(6)</sup>

$$J_p = \alpha \left(\frac{\sigma_y^2}{E}\right) G \cdot h_1(n) \left[\frac{P}{P_o}\right]^{n+1} \quad (2)$$

여기서,  $G$ 는 길이차원을 갖는 함수이며,  $P_o$ 는 무차원화 하중으로 임의로 정의될 수 있다. 소성 영향 함수  $h_1$ 은 균열의 기하학적 형상 및 가공경화지수 ( $n$ )에 대한 함수이다. 반면,  $J$ -적분의 탄성 성분은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} = \left(\frac{\sigma_y^2}{E}\right) G \cdot h_1(n=1) \left[\frac{P}{P_o}\right]^2 \quad (3)$$

여기서,  $K$ 는 선형 탄성 파괴역학 매개 변수인 응력확대계수(stress intensity factor)이며, 평면 변형률(plane strain) 상태에 대해서는  $E'=E/(1-\nu^2)$ 이며 평면 응력(plane stress) 상태에 대해서는  $E'=E$ 이다. 식 (3)에서  $h_1(n=1)$ 은 탄성재료( $n=1$ )에 대한  $h_1$ 값을 의미한다. 식 (2)를 식 (3)를 이용하여 무차원화 시키면,

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \left[\frac{P}{P_o}\right]^{n-1} \quad (4)$$

일반적으로  $h_1(n)/h_1(n=1)$ 의 값은 균열길이와 가공경화지수( $n$ )에 대해 아주 민감하게 변화한다. 이러한 민감성을 줄이기 위해  $P_o$ 와 다른 하중인 참조하중  $P_{ref}$ 를 도입하자. 만약 식(4)에서  $P_{ref}$ 를 이용하여 하중을 무차원화 한다면

$$\frac{J_p}{J_e} = \alpha \left\{ \frac{h_1(n)}{h_1(n=1)} \left[\frac{P_{ref}}{P_o}\right]^{n-1} \right\} \left[\frac{P}{P_{ref}}\right]^{n-1} \quad (5)$$

여기서  $\{ \}$ 안에 있는  $h_1(n)/h_1(n=1)$ 와  $P_{ref}/P_o$ 는 무차원 함수이며 균열길이와 가공경화지수( $n$ )에 대해 변화할 것이다. 하지만 참조하중  $P_{ref}$ 를 잘 선택한다면  $\{ \}$ 의 균열길이와 가공경화지수( $n$ )에

대한 민감성을 최소로 줄일 수가 있을 것이다. 이러한 하중을 최적 참조 하중(Optimized reference load),  $P_{oR}$ ,이라 한다면, 탄성 조건하( $n=1$ )에서  $\{\}$ 안의 함수가 1이 되는 것을 고려할 때, 식(5)은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\frac{J_p}{J_e} \approx \alpha \left[ \frac{P}{P_{oR}} \right]^{n-1} \quad (6)$$

식 (6)은 재료가 이상적인 Ramberg-Osgood 거동을 보이는 경우에만 적용된다. 만약 재료가 그러한 이상적인 거동이 아닌 일반적인 거동을 보일 경우 다음과 같이 일반화된다.

$$\frac{J_p}{J_e} \approx \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{P}{P_{oR}} \sigma_y \quad (7)$$

여기서  $\sigma_{ref}$ 는 참조응력을 의미하고,  $\epsilon_{ref}$ 는 실제 응력-변형률 선도에서 측정된  $\sigma = \sigma_{ref}$ 에서의 변형률을 의미한다. 식(7)은 소성 성분의 J-적분 계산식이며, 소성 보정을 이용한 전 J-적분은 다음과 같이 정리된다<sup>(6)</sup>:

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \right)^2 \frac{\sigma_{ref}}{E \epsilon_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{P}{P_{oR}} \sigma_y \quad (8)$$

식(8)을 살펴보면, 만약 균열구조물의 탄성성분의 J-적분 ( $J_e$ )와 최적 참조하중( $P_{oR}$ ), 그리고 재료의 응력-변형률 선도가 있으면 그 구조물의 J-적분을 계산할 수 있다. 일반적으로 균열구조물의  $J_e$ 는 기존 해를 혹은 탄성해석을 통해 쉽게 구할 수 있으며,  $P_{oR}$ 을 구하기 위해선 제한적인 유한요소 해석이 필요하다.

### 3.2 최적 참조 하중, $P_{oR}$

본 논문에서 제시된 개선된 참조응력법의 가장 중요한 변수는 최적 참조 하중( $P_{oR}$ )의 결정이다. 이를 위해서는 일반적으로 제한된 유한요소 해석을 수행하여 GE/EPRI방법의 소성 영향함수를 결정 한 후 이 결과를 토대로 최적 참조 하중을 결정할 수 있다.

여기서 제시된 방법과 기존의 방법들을 비교해 볼 만하다. 먼저 개선된 참조 응력법과 GE/EPRI방법은 모두 유한요소 해석을 이용한다는 점에서는 공통적이나, 필요한 유한요소 해석 양에서 많은 차이를 보인다. 예로, 복합하중을 받는 균열배관 해석의 경우 GE/EPRI방법은 가능한 모든 경우에 대한 해석을 여러가지의 소성 경화지수(Strain hardening exponent)에 대해 수행하므로 막대한 시

간과 노력이 필요한 반면, 개선된 참조 응력법에서는 소성 한계해석과 극히 제한된 유한요소해석 만으로도 최적 참조 하중을 결정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존의 참조응력법과 비교한다면 제한된 유한요소 해석이 필요하긴 하나 정확성이 뛰어나다는 장점이 있다.

다음 장들에서는 개선된 참조 응력법의 배관 건전성 평가에의 응용에 대해 설명한다.

## 4. 배관 파단 전 누설해석에의 응용

배관의 파단 전 누설(Leak-Before-Break, LBB)해석을 위해서는 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분 계산이 필요하다<sup>(14)</sup>.

### 4.1 개선된 참조 응력법에 입각한 J-적분 계산식

Fig. 1은 원주방향 관통균열을 가진 배관과 중요한 변수들을 나타낸 것이다. 이러한 배관이 인장 하중( $P$ ), 굽힘모멘트( $M$ ), 혹은 내압( $p$ )이 작용할 경우 제한된 유한요소 해석을 통해 다음과 같은 최적 참조하중( $P_{oR}$ ), 최적 참조모멘트( $M_{oR}$ ), 혹은 최적 참조내압( $p_{oR}$ )이 결정된다<sup>(15, 16)</sup>:

$$\begin{aligned} P_{oR} &= \gamma \cdot P_L ; M_{oR} = \gamma \cdot M_L \\ p_{oR} &= \psi \cdot p_L \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, 소성 한계 하중, 모멘트 그리고 압력,  $P_L$ ,  $M_L$ ,  $p_L$ ,는 다음과 같이 정의된다.

$$P_L = 2R_m t \sigma_y \left[ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left( \frac{1}{2} \sin \theta \right) \right] \quad (10)$$

$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_y \left[ \cos \left( \frac{\theta}{2} \right) - \frac{1}{2} \sin \theta \right] \quad (11)$$

$$p_L = \frac{2t}{\pi R_m} \sigma_y \left[ \pi - \theta - 2 \sin^{-1} \left( \frac{1}{2} \sin \theta \right) \right] \quad (12)$$

또한 식 (9)에서 무차원 상수인  $\gamma, \psi$ 는 균열 길이의 함수로 다음과 같이 정의된다<sup>(4)</sup>.

$$\gamma(\theta) = 0.82 + 0.75 \left( \frac{\theta}{\pi} \right) + 0.42 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^2 \quad (13)$$

$$\psi(\theta) = 0.45 + 1.88 \left( \frac{\theta}{\pi} \right) - 0.75 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^2 \quad (14)$$

관통 균열 배관이 인장하중과 모멘트의 복합하중을 받을 경우, 최적 참조 하중은 다음의 항목 캐직에서 구할 수 있다<sup>(17)</sup>.

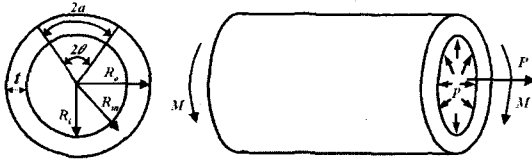


Fig. 1 Circumferential through-wall cracked pipes under axial tension ( $P$ ), pure bending ( $M$ ) and internal pressure ( $p$ ).

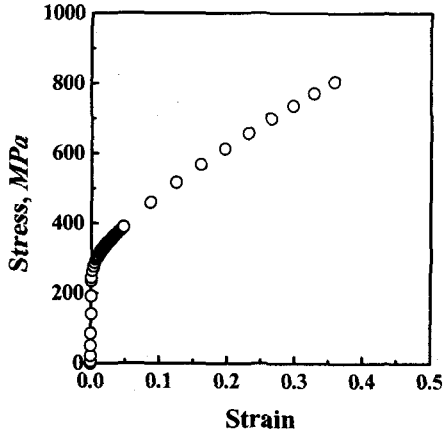


Fig. 2 Stress-strain curve and three different fitting results for SA312 TP304 steel (50°C)

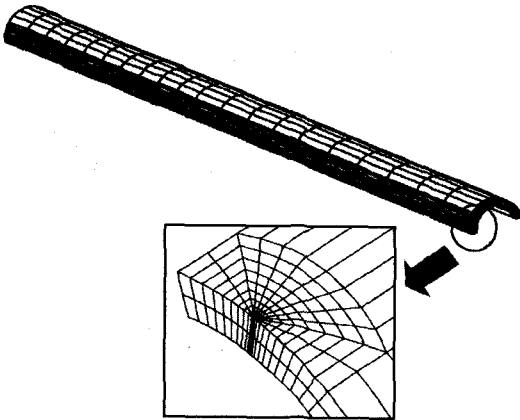


Fig. 3 A 3-D FE mesh for the circumferentially through-wall cracked pipe

$$\left(\frac{P}{P_{oR}}\right)^2 + \frac{M}{M_{oR}} = 1 \quad (15)$$

여기서  $P_{oR}$  과  $M_{oR}$ 은 식(9)에서 구할 수 있다. 마찬가지로 내압과 모멘트가 동시에 작용할 경우

$$\left(\frac{P}{P_{oR}}\right)^2 + \frac{M}{M_{oR}} = 1 \quad (16)$$

로부터 최적 참조 하중을 구할 수 있다<sup>(16)</sup>.

반면 탄성성분의  $J$ -적분 ( $J_e$ )는 기존 제시된 해와 선형 중첩을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

#### 4.2 유한요소 해석을 이용한 검증

유한요소해석에 사용된 재료는 국내 원자력발전소 배관의 재질로 사용되는 288°C에서 수행된 TP316 그리고 50°C에서 수행된 TP304 스테인레스강의 인장 실험 결과를 사용하였으며, Fig. 2에 TP316 응력-변형률 곡선을 나타나 있다. 해석에 사용된 배관의 외경과 두께는 각각 355.6mm, 35.7mm이며,  $R_o/t$  값은 4.48 이다. Fig. 3은 해석에 사용된 대표적인 유한요소모형을 나타낸 것이다. 해석 모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4 만을 모델링하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램<sup>(18)</sup>을 사용하였으며, 20 절점 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.

Fig. 4는 두 가지 균열 길이를 가진 관통균열 배관이 순수 굽힘을 받을 경우에 대해 유한요소해석으로 구한  $J$ -적분을 개선된 참조 하중법으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 5는 그 배관이 인장하중과 모멘트를 동시에 받는 경우에 대한 결과이다. 이들 결과에서 보는 바와 같이 개선된 참조 응력법에 의해 계산된  $J$ -적분 값들은 모든 경우에 유한요소 해석 결과와 아주 잘 일치한다. 더 다양한 경우에 대한 유한요소 해석 혹은 실험 검증은 다른 문헌<sup>(19-21)</sup>에서 찾아 볼 수 있다.

#### 5. 배관 표면균열해석에의 응용

일반적으로 배관의 균열은 표면균열의 형태로 존재하게 되며 이러한 배관의 건전성 평가를 위해서는 표면균열에 대한 정확한  $J$ -적분 계산이 필수적이다. 특히 표면균열 건전성 평가의 중요한 문제 중 하나는 균열선단의 위치에 따라  $J$ -적분이 변하며, 공학적  $J$ -적분 계산식은 균열선단의 모든 위치에 따라 계산될 수 있어야 한다. 이러한 문제로 인해 만족할 만한 표면균열의 공학적  $J$ -적분 계산식은 제시되기가 어려웠다.

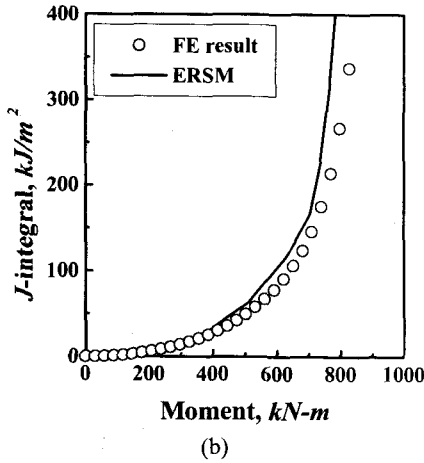
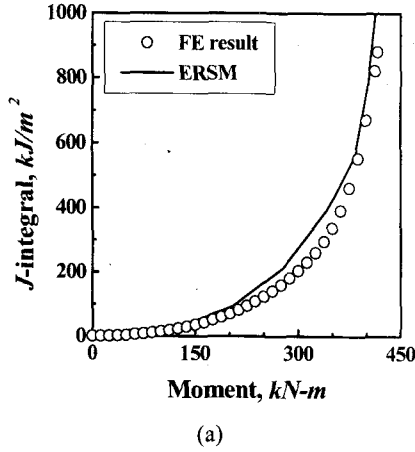


Fig. 4 Comparison of FE  $J$  values under pure bending with those of the proposed method for (a)  $\theta/\pi = 0.4$  and (b)  $\theta/\pi = 0.125$ .

### 5.1 개선된 참조 응력법에 입각한 $J$ -적분 계산식

Fig. 6은 원주방향 표면균열을 가진 배관과 중요한 변수들을 나타낸 것이다. 이러한 배관이 내압( $p$ ) 혹은 굽힘모멘트( $M$ )이 작용할 경우 제한된 유한요소 해석을 통해 구한 최적 참조내압( $p_{oR}$ ) 그리고 최적 참조모멘트( $M_{oR}$ )은 다음과 같다.<sup>(22)</sup>

$$p_{oR} = \gamma \cdot p_L \quad \text{for internal pressure}$$

$$\gamma = 1.767(a/t)(\beta/\pi) - 0.156(a/t) - 0.101(\beta/\pi) + 0.627 \quad (17)$$

$$M_{oR} = \gamma \cdot M_L \quad \text{for global bending}$$

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

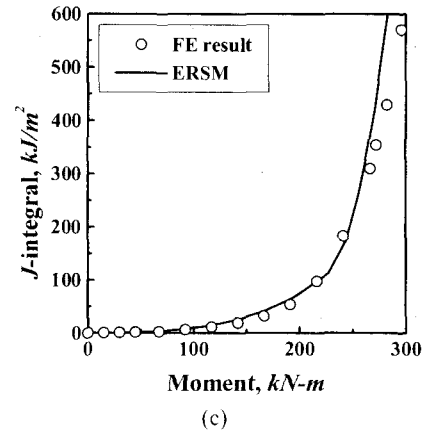
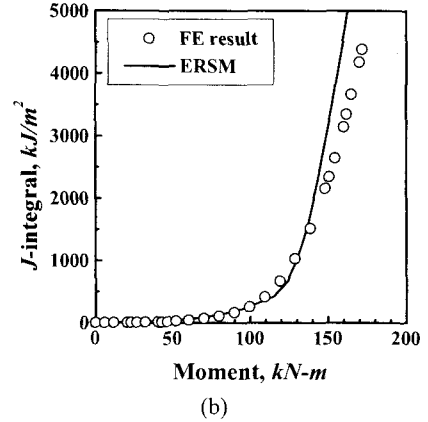
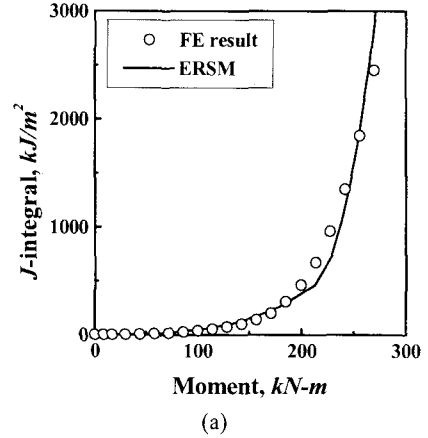
$$\theta_1 = 4.26(\beta/\pi)^2 - 1.35(\beta/\pi) + 0.80 \quad (18)$$

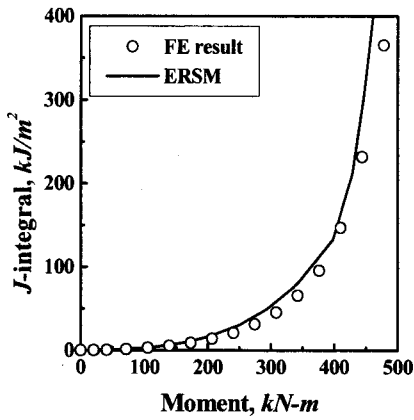
$$\theta_2 = -2.30(\beta/\pi)^2 - 1.57(\beta/\pi) - 0.77$$

여기서 소성 한계압력  $p_L$  과 모멘트  $M_L$  은 다음과 같이 정의된다.

$$p_L = \frac{2\sigma_y t}{R_m} \left( 1 - \frac{\beta a/t + 2\sin^{-1}[a \sin(\beta/2)/t]}{\pi} \right) \quad (19)$$

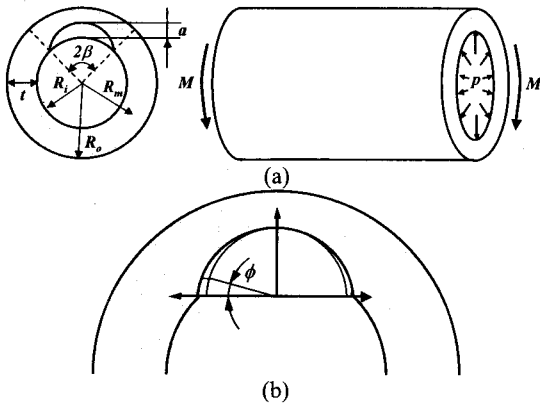
$$M_L = 4R_m^2 t \sigma_y \left( \cos\left[\frac{a\beta}{2t}\right] - \frac{a \sin \beta}{2t} \right) \quad (20)$$



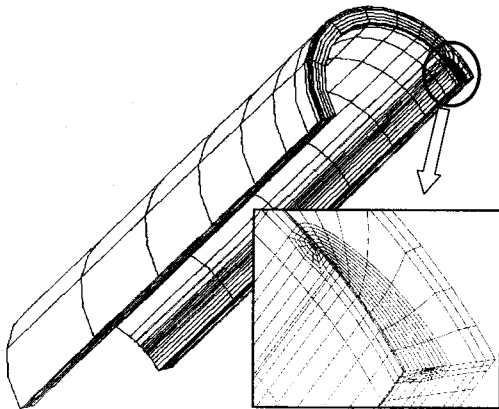


(d)

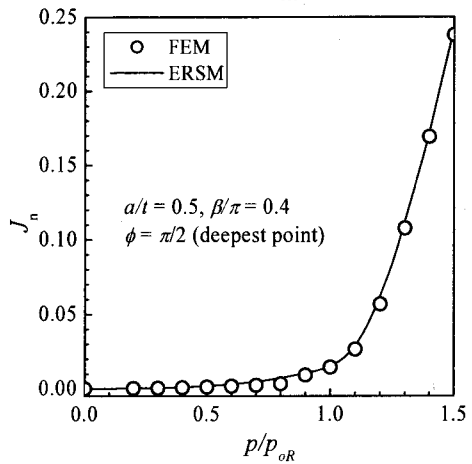
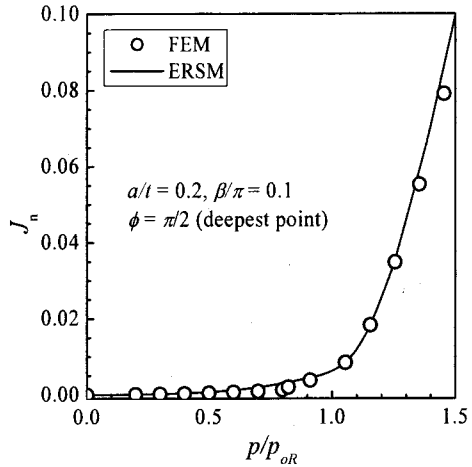
**Fig. 5** Comparison of FE  $J$  values for combined bending and tension with those of the proposed method: for the load proportionality factor  $\lambda=0.5$  (a)  $\theta/\pi=0.4$ , (b)  $\theta/\pi=0.125$ , for  $\lambda=2.0$  (c)  $\theta/\pi=0.4$ , (d)  $\theta/\pi=0.125$ .



**Fig. 6** (a) Schematic illustration for surface cracked pipes in internal pressure  $p$  and in global bending  $M$ , and (b) definition of the crack angle  $\phi$ .



**Fig. 7** A typical FE mesh for  $R_m/t=5$ ,  $a/t=0.3$  and  $\beta/\pi=0.1$ .



**Fig. 8.** Comparison of the FE  $J$  results with those from the proposed method under internal pressure.

한 가지 팔목할 만한 사실은 개선된 참조응력법에 의하면 단순히 균열선단의 주어진 위치에 대한 탄성성분의  $J$ , 즉  $J_e$ 를 식(8)에 사용하면 그 위치에서의 탄소성  $J$ -적분값을 계산할 수 있다는 것이다. 예로, 만약 균열의 표면점( $\phi=0$ , 그림 6)에서의  $J$ 값을 구하고 싶다면, 표면점에 해당하는  $J_e$ 값을 식(8)에 사용하면 된다. 일반적으로 표면 균열의  $J_e$ 해는 균열 표면 모든 점에 대해 주어지기 때문에 개선된 참조응력법을 이용하면 균열 표면 모든 점에 대한 탄소성  $J$ 값을 구할 수 있다.

## 5.2 유한요소 해석을 이용한 검증

해석에 사용된 재료와 배관은 이 전과 동일하며, Fig. 7 은 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델을 나타낸다.

Figs. 8과 9는 두 가지 균열 형상을 가진 표면 균열 배관이 내압과 모멘트의 단순 하중을 받는 경우에 대해 유한요소해석으로 구한  $J$ -적분을 개

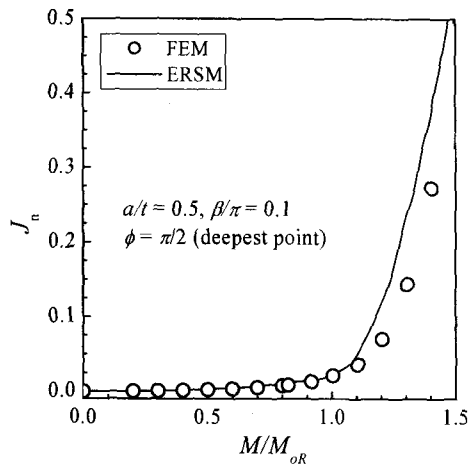
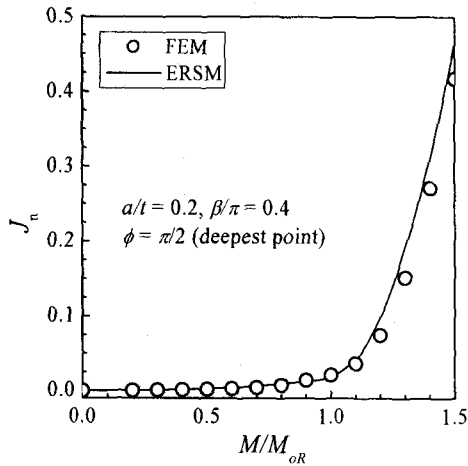


Fig. 9. Comparison of the FE  $J$  results with those from the proposed method under global bending.

선된 참조 하중법으로 구한 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서  $J$ -적분은 다음과 같이 무차원화하였다.

$$J_n = \frac{J}{\sigma_y(t-a)(a/t)} \quad (21)$$

Figs. 8 과 9 의 결과는 모두 표면 균열 최심점에서의  $J$ -적분값을 비교한 것이다. Fig. 10 에서는 개선된 참조 응력법에 기초한  $J$ -적분의 균열면 임의의 점에서의 타당성을 보이기 위해 균열면을 따라 몇 개의 점에서 유한요소해석결과를 예측결과와 비교하였다. 결과에서 보는 바와 같이, 개선된 참조 응력법에 의해 계산된  $J$ -적분은 표면점을 포함한 균열면 임의의 점에서 유한요소해석결과와 잘 일치하였다. 더 다양한 경우에 대한 유한요소 해석 검증은 다른 문헌<sup>(23)</sup>에서 찾아 볼 수 있다.

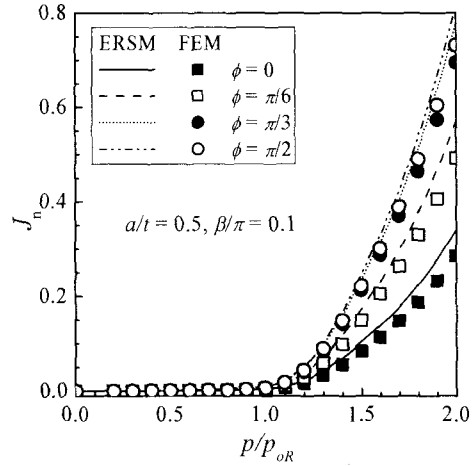
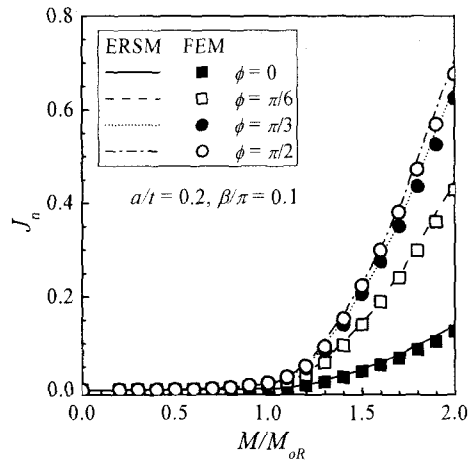


Fig. 10. Comparison of the FE  $J$  results at various points along the crack front ( $\phi=0, \pi/6, \pi/3$  and  $\pi/2$ ) with those from the proposed method.

## 6. 고온배관 크리프 균열 해석에의 응용

균열이 있는 배관이 크리프 온도에서 가동될 경우 균열은 크리프에 의해 진전하게 된다. 이러한 배관의 건전성 평가를 위해서는 크리프 균열진전을 예측해야 하며, 이를 위해 크리프 매개 변수인  $C^*$ -적분을 계산해야 한다.

3.1 개선된 참조 응력법에 입각한  $C^*$ -적분 계산식  
소성과 크리프의 유사성을 감안하면 개선된 참조 응력법에 입각한  $C^*$ -적분 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$C^* = \left( \frac{K^2}{E'} \right) \frac{E \dot{\epsilon}_c}{\sigma_{ref}} \quad (22)$$

여기서  $\sigma_{ref}$ 는 참조응력이며,  $\dot{\epsilon}_c$ 는  $\sigma = \sigma_{ref}$ 에서의 크리프 변형을 선도에서 결정된 크리프 변형률 속도이다. 참고로 식(22)는 멱급수 형태의 이상화된

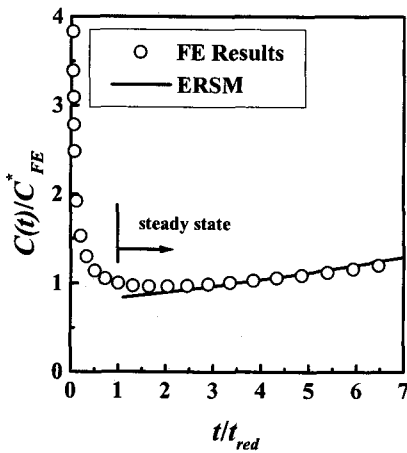
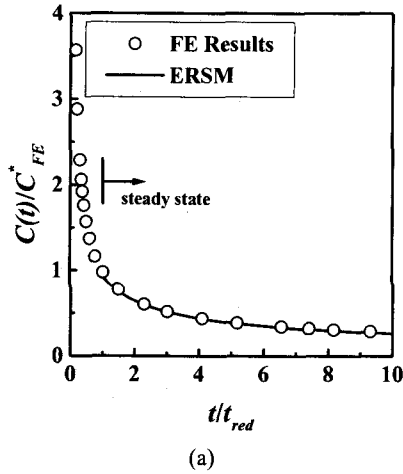


Fig. 11. Comparison of the FE  $C^*$  results with those from the proposed method for through-wall cracked pipes: (a) under global bending,  $\theta/\pi=0.4$ , RCC-MR law, and (b) under internal pressure,  $\theta/\pi=0.125$ ,  $\theta$ -projection law.

크리프-변형률 선도 뿐만 아니라 일반적인 크리프-변형률 선도에도 적용이 가능하다.

### 3.2 유한요소 해석을 이용한 검증

앞서 기술된 유한요소 모델을 이용하여 관통 균열과 표면 균열이 존재하는 배관이 내압 혹은 모멘트를 받을 경우에 대한 탄성-크리프 해석을 수행하였다. 사용된 재료는 565°C의 CMV 강의 크리프 물성치인  $\theta$ -projection law<sup>(24)</sup>와 TP316 스테인레스강의 크리프 물성치인 RCC-MR law<sup>(25)</sup>를 사용하였다.

Fig. 11은 관통균열을 가진 배관이 모멘트와 내압을 받을 경우 RCC-MR과  $\theta$ -projection creep law에 대한 유한요소 해석  $C^*$  결과와 개선된 참조

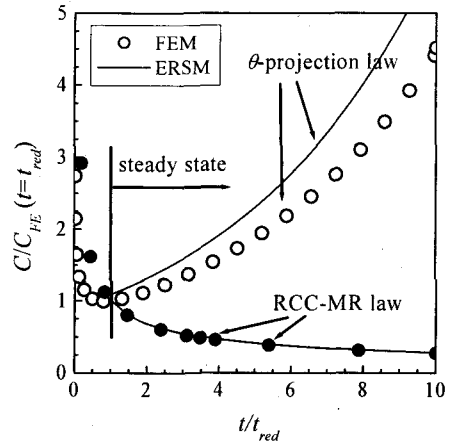


Fig. 12. Comparison of the FE  $C^*$  results with those from the proposed method for surface cracked pipes under pressure with  $a/t=0.5$  and  $\beta/\pi=0.4$ .

응력법에 기초한  $C^*$ -적분의 결과를 비교한 그림이다. Fig. 12는 표면균열을 가진 내압을 받을 경우에 대한 유한요소 해석  $C^*$  결과와 개선된 참조 응력법에 기초한  $C^*$ -적분의 결과를 비교한 그림이다. 이들 결과에서 보는 바와 같이 일반 크리프 법칙을 따르는 재료인 경우에도 개선된 참조 응력법은 정확한  $C^*$ -적분의 제공한다. 더 다양한 경우에 대한 탄성-크리프 유한요소 해석 검증은 다른 문헌<sup>(23, 26)</sup>에서 찾아 볼 수 있다.

## 7. 결론

본 논문에서는 저자들이 최근에 제안한 새로운 비선형 파괴역학 해석 방법인 개선된 참조 응력법에 의한 공학적  $J$ -적분과  $C^*$ -적분의 계산에 대해 간략한 설명과 검증을 하였다. 이 방법은 기존의 다른 방법에 비해 더 정확하며, 결과가 안정적이며, 간단하여 아주 복잡한 문제에도 쉽게 확대 적용이 가능하다는 장점이 있다. 더욱 중요한 장점은 제안된 방법은 표면균열의 경우 균열의 임의의 점에서  $J$ -적분과  $C^*$ -적분을 계산할 수 있다는 것이다. 지금까지는 주로 관통균열 그리고 표면균열을 갖는 직관의 복합하중에 대한 문제를 고려했으나 향후 곡관에 존재하는 균열 해석, 배관 용접부 균열 해석, 열하중과 기계하중을 동시에 받는 배관의 균열 해석, 분지관의 용접부에 존재하는 균열 해석 등 다양한 현장 문제에 대한 해석으로 확대 적용할 예정이다.



## 후 기

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

## 참고문헌

1. Rice, J.R., 1968, "A Path Independent Integral and the Approximated Analysis by Notches and Cracks", *Journal of Applied Mechanics*, 35, pp. 379-386.
2. Kumar V, German D, Shih CF. *An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis*. EPRI Final Report NP 1931, 1981.
3. Kumar V. *Estimation Technique for the Prediction of Elastic-Plastic Fracture of Structural Components of Nuclear Systems*. 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> Semi-annual Reports to EPRI, 1982.
4. Kumar, V. and German, M.D., 1998, *Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders*, EPRI Report, NP-5596.
5. Zahoor, A., 1991, *Ductile Fracture Handbook*, Novotech Corp. 3 Volumes.
6. R6, 1999, *R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Revision 3, Amendment 10*, British Energy.
7. R5, 1998, *R5: Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 2*, British Energy.
8. Wilkowski, G, et al., 1997, International Piping Integrity Research Group (IPIRG) Program - Program Final Report. NUREG/CR-6233, USNRC.
9. Hopper, A, et al., 1997, The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program - Final Report. NUREG/CR-6452, USNRC, 1997.
10. Final Procedure: SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry), Brite-Euram Project, BE95-1426, November 1999.
11. Anderson, TL., 1995, *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, CRC Press.
12. Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.
13. Penny R.K. and Marriot, D-L., 1995, *Design for Creep*, Chapman & Hall.
14. NUREG 1061 (1984). Evaluation of potential for pipe break, Volume 3. USNRC.
15. 김윤재, 허남수, 김영진, "원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 J-적분 및 COD 계산을 위한 새로운 공학적 계산식," 대한기계학회 논문집 A 권, 제 25 권, 제 3 호, pp. 548~553, 2001
16. Y-J Kim, N-S Huh and Y-J Kim, 2001, "Quantification of Pressure-Induced Hoop Stress Effect on Fracture Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes", Submitted for publication to *Engineering Fracture Mechanics*.
17. 허남수, 김윤재, 김영진, "인장하중과 굽힘모멘트가 동시에 작용하는 원주방향 관통균열이 존재하는 배관의 새로운 J-적분 및 COD 계산식," 한국정밀공학회지, 게재 예정, 2001.
18. ABAQUS, 1998, *ABAQUS Standard/User's Manual, Version 5.8-1*, Hibbit Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA US.
19. 허남수, 김윤재, 김영진, "원자력배관의 파단전 누설 해석을 위한 개선된 참조응력법의 수치해석적 검증," 대한기계학회 논문집 A 권, 제25권, 제4호, pp. 741~747, 2001. See also Y-J Kim, N-S Huh and Y-J Kim, 2001, "Enhanced Reference Stress Based J and COD Estimation Method for LBB Analysis and Comparison with GE/EPRI Method", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* (in print).
20. 허남수, 김윤재, 김영진, "복합하중이 작용하는 원자력 배관의 파단 전 누설 해석을 위한 개선된 참조 응력법의 수치해석적 검증," 한국정밀공학회지, 게재 예정, 2001. See also Y-J Kim, N-S Huh and Y-J Kim, 2001, "Reference Stress Based Elastic-Plastic Fracture Analysis for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes under Combined Bending and Tension", *Engineering Fracture Mechanics* (in print).
21. Y-J Kim, N-S Huh and Y-J Kim, 2001, "Crack Opening Analysis of Complex Cracked Pipes", *International Journal of Fracture* (in print).
22. Y-J Kim, J-S Kim and Y-J Kim, 2001, "Fracture Analyses of Circumferential Surface Cracked Pipes: Part I-Fully Plastic J Solutions", Submitted for publication to *International Journal of Fracture*.
23. Y-J Kim, J-S Kim and Y-J Kim, 2001, "Fracture Analyses of Circumferential Surface Cracked Pipes: Part II-FE Validation", Submitted for publication to *International Journal of Fracture*.
24. R66, 1999, *AGR Materials Data Handbook, Issue 5. C D Hamm (ed.)*, British Energy Generation Ltd.
25. RCC-MR, 1985, *Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands*, AFCEN, Paris.
26. Y-J Kim, J-S Kim and Y-J Kim, 2001, "Engineering C-Integral Estimations for Generalised Creep Behaviours and Finite Element Validation", Submitted for publication to *International Journal of Pressure Vessels and Piping*.