

## 광범위 크리프 조건에 대한 관통균열 배관의 크리프 파괴역학 해석

허남수\* · 김윤재\* · 김영진†

(2002년 5월 6일 접수, 2003년 4월 3일 심사완료)

### Creep Fracture Mechanics Analysis for Through-Wall Cracked Pipes under Widespread Creep Condition

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

**Key Words :**  $C^*$ -integral( $C^*$ -적분), Crack Opening Displacement(균열열림변위), Reference Stress Method(참조응력법), Through-Wall Crack(관통균열)

#### Abstract

This paper compares engineering estimation schemes of  $C^*$  and creep COD for circumferential and axial through-wall cracked pipes at elevated temperatures with detailed 3-D elastic-creep finite element results. Engineering estimation schemes included the GE/EPRI method, the reference stress method where reference stress is defined based on the plastic limit load and the enhanced reference stress method where the reference stress is defined based on the optimized reference load. Systematic investigations are made not only on the effect of creep-deformation behaviour on  $C^*$  and creep COD, but also on effects of the crack location, the pipe geometry, the crack length and the loading mode. Comparison of the FE results with engineering estimations provides that for idealized power law creep, estimated  $C^*$  and COD rate results from the GE/EPRI method agree best with FE results. For general creep-deformation laws where either primary or tertiary creep is important and thus the GE/EPRI method is hard to apply, on the other hand, the enhanced reference stress method provides more accurate and robust estimations for  $C^*$  and COD rate than the reference stress method.

#### 1. 서론

고온에서 운전되는 관통균열 배관의 정확한 비선형 파괴역학 매개변수 계산은 석유화학설비나 발전설비 등의 건전성 평가시 매우 중요한 문제이다. 예로, 단순 하중에 대한 탄소성 파괴역학(elastic-plastic fracture mechanics) 해석을 위해서는 작용하중에 의한  $J$ -적분을 정확하게 계산해야 하며, 크리프(creep) 균열 성장 평가를 위해서는 시간 의존적 파괴역학(time-dependent fracture mechanics) 매개변수인  $C^*$ -적분을 정확하게 계산해야 한다.<sup>(1,2)</sup> 또한 배관의 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 해석시에는 누설률 계산을 위해 균열열림변위(crack opening displacement)를 계산해야 한다.

이와 같은 비선형 파괴역학 매개변수 계산시 가장 널리 사용되고 있는 방법 가운데 하나가 GE/EPRI법<sup>(3,4)</sup>이다. 그러나 GE/EPRI법을 구조물 해석에 적용하기 위해서는 재료의 응력-변형률 곡선이나 크리프 변형률 곡선을 Ramberg-Osgood(R-O) 관계나 멱급수(power-law) 관계로 이상화하여야 한다. 그러나 일반적인 재료의 거동은 위와 같은 단순한 관계로 이상화하기 어려우며, 이로 인해  $J$ -적분,  $C^*$ -적분, 그리고 COD 계산시 큰 오차가 발생하게 된다.<sup>(2)</sup> 또한 GE/EPRI법은 특정 범위의 제한된 균열 및 구조물 형상에 대해서만 해가 제시되어 있기 때문에 사용이 제한적이다.

Ainsworth<sup>(5)</sup>는 이러한 GE/EPRI법의 문제점을 개선하기 위해 참조응력(Reference Stress; RS)법을 제시하였고, 균열 구조물의 건전성 평가를 위한 R5 평가법<sup>(6)</sup>과 R6 평가법<sup>(7)</sup>에 적용 중이다. 참조응력법의 장점은 재료물성치에 대한 이상화를 수행하지 않고 실제 응력-변형률 데이터나 크리프 변형률 데이터를 이용하여  $J$ -적분,  $C^*$ -적분, 그리고 COD를 계산하므로 이상화에 따른 오차를 줄일

\* 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim50@skku.edu

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

수 있다는 것이다. 또한 해석 결과가 안정적(robust)이며, 사용이 편리하다는 장점도 있다.

참조응력 개념 기반의 계산식에서 가장 중요한 점은 참조응력의 정의이다. 기존의 참조응력법에서는 비선형 파괴역학 매개변수 계산시 소성한계 하중(plastic limit load)을 사용하여 참조응력을 정의하나 일반적으로 계산 결과가 부정확하다.<sup>(7,8)</sup>

저자들은 전보<sup>(9-12)</sup>에서 기존의 참조응력법의 정확성을 향상시키기 위해서 최적참조하중(optimized reference load) 기반의 개선된 참조응력(Enhanced Reference Stress; ERS)법을 제시한 바 있다. ERS법의 최적참조하중은 제한된 유한요소해석을 통해 쉽게 구할 수 있으며, 확대 적용이 용이하다. 저자들은 이미 복합균열이 존재하는 경우나 복합하중이 작용하는 경우에 확대 적용하여 ERS법의 확장성과 정확성을 입증한 바 있다.<sup>(13,14)</sup>

본 논문에서는 원주방향 및 축방향 관통균열 배관에 대한  $C^*$ -적분과 COD 계산을 위한 기존의 공학적 계산식과 저자들이 제시한 ERS법의 정확성을 검증하였다. 이를 위해 먹급수 크리프 법칙과 일반 크리프 법칙을 이용한 3차원 탄성-크리프 유한요소해석을 수행하였다.

## 2. $C^*$ -적분 및 COD 계산을 위한 공학적 계산식

### 2.1 GE/EPRI법

R-O 관계를 따르는 재료의 응력-변형률 곡선은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_o} = \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $n$ 은 각각 R-O 상수와 가공경화지수이며,  $\sigma_o$ 는 재료의 항복강도이다. 또한  $\epsilon_o$ 는  $\sigma_o/E$ 이다.

이때 GE/EPRI법을 이용한  $J$ -적분과 COD의 소성성분은 다음 식으로 구한다.<sup>(3,4)</sup>

$$J_p = \alpha \sigma_o \epsilon_o G h_1 \left( n \left( \frac{Q}{Q_o} \right) \right)^{n+1} \quad (2)$$

$$\delta_p = \alpha \epsilon_o G h_2 \left( n \left( \frac{Q}{Q_o} \right) \right)^n \quad (3)$$

여기서,  $G$ 는 균열 구조물의 특성 길이(characteristic length)이며,  $h_1$ 과  $h_2$ 는 무차원 소성영향함수이다. 또한  $Q$ 는 일반화된 작용하중(generalized loading, 굽힘 모멘트, 인장하중 또는 내압)이며,  $Q_o$ 는 일반화된 기준하중이다.

소성영향함수는 유한요소해석을 통해 구조물의 형상, 균열 길이, 하중 형태, 그리고 가공경화지수의 함수로 구해진다. 예로, 굽힘 모멘트나 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 값은 참고문헌 (4)에 제시되어 있으며, 내압이 작용하는 원주방향 관통균열 배관은 참고문헌 (11), 그리고

내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관은 참고문헌 (12)에 제시되어 있다.

정상상태 크리프 조건 하에서 먹급수 크리프 법칙을 따르는 재료의 경우는 GE/EPRI법을 이용하여  $C^*$ -적분을 계산할 수 있다. 이 방법은 먹급수 법칙을 따르는 정상상태 크리프와 같은 먹급수 형태로 표현되는 재료의 소성한 사이의 유사성(analogy)에 기초한 것이다.

먹급수 법칙을 따르는 정상상태 크리프의 크리프 변형률 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_o \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n = A \sigma^n \quad (4)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_c$ 는 크리프 변형률 속도이며,  $A$ 와  $n$ 은 재료 상수이다.

이때  $C^*$ -적분과 COD 계산식은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$C^* = A G h_1 \left( n \left( \frac{Q \sigma_o}{Q_o} \right) \right)^{n+1} \quad (5)$$

$$\delta = A G h_2 \left( n \left( \frac{Q \sigma_o}{Q_o} \right) \right)^n \quad (6)$$

GE/EPRI법은 유한요소해석으로 구한 소성영향 함수를 사용하므로 먹급수 크리프 법칙을 따르는 경우에는 정확하다. 그러나 대부분의 재료는 먹급수 법칙으로 크리프 변형률 데이터를 이상화하기 어렵기 때문에  $C^*$ -적분 및 COD 결과가 부정확하다.

### 2.2 참조응력법(RS법)

참조응력법을 이용한  $J$ -적분의 소성 성분 계산식은 다음과 같다.<sup>(5,9)</sup>

$$\frac{J_p}{J_e} = \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_L} \sigma_o \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_{ref}$ 는 참조응력이며  $\epsilon_{ref}$ 는 진응력-진변형률 선도의  $\sigma_{ref}$ 에서 정의되는 진변형률이다. 또한  $Q_L$  일반화된 소성한계하중이며,  $J_e$ 는  $J$ -적분의 탄성 성분으로 다음과 같이 표현된다.

$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (8)$$

여기서,  $K$ 는 응력확대계수이며 평면응력 조건에서  $E'=E$ 이고 평면변형률 조건에서  $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다.

Fig. 1(a)와 같이 인장하중이나 굽힘 모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 참조응력(식 (7))을 정의하기 위한 소성한계하중과 소성한계모멘트는 다음과 같이 표현된다.

$$P_L = 2\sigma_o R_m t \left\{ \pi - \theta - 2\sin^{-1} \left( \frac{1}{2} \sin \theta \right) \right\} \quad (9)$$

$$M_L = 4\sigma_o R_m^2 t \left( \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \right) \quad (10)$$

내압이 작용하는 원주방향 관통균열 배관의 경

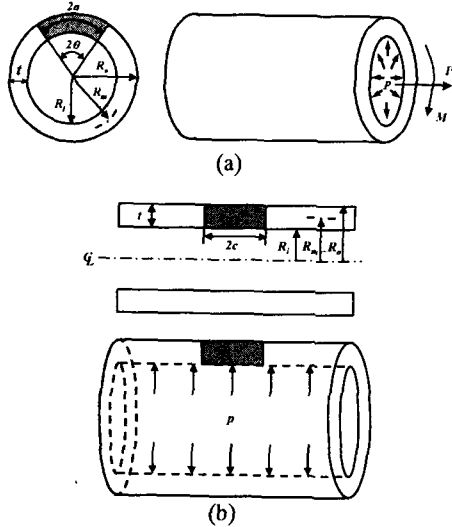


Fig. 1 Schematic illustrations for a pipe with (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack

우,  $0 \leq \theta/\pi < 0.263$ 의 범위에서는 원주방향 응력(hoop stress)이 지배적이며 이때 소성한계압력은 다음과 같이 표현된다.<sup>(15)</sup>

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \frac{t}{R_m} \left\{ 1 - 0.28 \left( \frac{\theta}{\pi} \right) - 0.92 \left( \frac{\theta}{\pi} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

반면,  $\theta/\pi \geq 0.263$ 인 경우에는 축방향 응력이 지배적이며 이때 소성한계압력은 다음과 같이 표현된다.

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

Fig. 1(b)와 같은 내압이 작용하는 축방향 관통 균열 배관의 소성한계압력은 다음과 같이 표현된다.<sup>(15)</sup>

$$p_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_o \frac{t}{R_m} \frac{1}{\sqrt{1 + 0.34\rho + 1.34\rho^2}} \quad (13)$$

여기서,  $\rho$ 는 무차원 균열길이로 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{c}{\sqrt{R_m t}} \quad (14)$$

식 (7)에 나타낸  $J$ -적분 계산식과의 유사성을 이용하면 정상상태 크리프 매개변수인  $C^*$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(2,6)</sup>

$$\frac{C^*}{J_e} = \frac{E \dot{\epsilon}_c}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_L} \sigma_o \quad (15)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_c$ 는 실제 크리프 변형률 데이터에서  $\sigma_{ref}$ 로부터 결정된 크리프 변형률 속도이다.

또한 크리프 COD 변화율도 참조응력과 크리프 변형률 속도를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{\dot{\delta}_c}{\delta_e} = \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_e} = \frac{\dot{\epsilon}_c}{(\sigma_{ref}/E)} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_L} \sigma_o \quad (16)$$

여기서,  $\dot{\delta}_c$ 는 크리프 COD 변화율이며,  $\delta_e$ 는 탄성 COD이다. 또한  $\epsilon_e$ 는 탄성 변형률이다.

앞서 언급한 바와 같이 GE/EPRI법은 이상화된 크리프 법칙에만 적용할 수 있으나, 참조응력법은 실제 크리프 변형 데이터를 사용하므로 일반 크리프 법칙에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 소성한계하중만 필요하므로 사용이 용이하며, 이미 많은 소성한계하중식이 제시되어 있다는 장점도 있다. 그러나 참조응력법도 일반적으로 계산결과가 부정확하다는 문제가 있다. 따라서 저자들은 기존 참조응력법의 부정확성을 개선하기 위해 개선된 참조응력법을 제시하였다.

### 2.3 개선된 참조응력법(ERS법)

기존의 참조응력법에서는 참조응력 정의시 소성한계하중이 사용되나 일반적으로 계산결과가 부정확하다. 따라서 저자들은 소성한계하중을 사용한 기존 참조응력법의 부정확성을 개선하기 위해 최적 참조하중을 사용한 개선된 참조응력법(ERS법)을 제시하였다.

ERS법을 이용한  $J$ -적분의 소성 성분 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{J_P}{J_e} = \frac{E \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_{OR}} \sigma_o \quad (17)$$

여기서,  $Q_{OR}$ 은 일반화된 최적참조하중을 의미한다.  $C^*$ -적분과 크리프 COD 변화율도 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{C^*}{J_e} = \frac{E \dot{\epsilon}_c}{\sigma_{ref}} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_{OR}} \sigma_o \quad (18)$$

$$\frac{\dot{\delta}_c}{\delta_e} = \frac{\dot{\epsilon}_c}{\epsilon_e} = \frac{\dot{\epsilon}_c}{(\sigma_{ref}/E)} ; \sigma_{ref} = \frac{Q}{Q_{OR}} \sigma_o \quad (19)$$

저자들은 최근 원주방향 및 축방향 관통균열 배관에 대한 최적참조하중식을 새롭게 제시하였으며, 원주방향 관통균열 배관의 최적참조하중과 최적참조모멘트는 다음과 같이 정의된다.<sup>(9,10)</sup>

$$P_{OR} = \gamma(\theta) \cdot P_L ; M_{OR} = \gamma(\theta) \cdot M_L \quad (20)$$

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

여기서,  $P_L$ 과  $M_L$ 은 각각 식 (9)와 식 (10)에 정의되어 있다.

내압이 작용하는 원주방향 관통균열의 최적참조압력은 다음과 같이 표현된다.<sup>(11)</sup>

**Table 1** Summary of the elastic-creep FE calculations for the present work. For each case, three different creep laws were employed

Crack type	Loading condition	$R_m/t$	$\theta/\pi$	$\rho$
Circumferential	Bending	5, 10	0.125, 0.4	-
	Tension	5, 10	0.125, 0.4	-
	Pressure	5, 10	0.125, 0.4	-
Axial	Pressure	5, 10	-	0.5, 1

$$p_{oR} = \psi(\theta) \cdot p_L^T$$

$$\psi(\theta) = 0.45 + 1.88\left(\frac{\theta}{\pi}\right) - 0.75\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2 \quad (21)$$

$$p_L^T = \frac{2t}{\pi R_m} \sigma_o \left\{ \pi - \theta - 2\sin^{-1}\left(\frac{1}{2}\sin\theta\right) \right\}$$

또한 내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관의 최적참조압력은 다음과 같이 표현된다.<sup>(12)</sup>

$$p_{oR} = \psi(\rho) \cdot p_L$$

$$\psi(\rho) = \begin{cases} -0.06\rho^2 + 0.21\rho + 0.82 & \text{for } \rho < 1.5 \\ 1 & \text{for } \rho \geq 1.5 \end{cases} \quad (22)$$

여기서,  $p_L$ 은 식 (13)에 정의되어 있다.

### 3. 유한요소 탄성 크리프 해석을 이용한 수치해석적 검증

#### 3.1 크리프 변형을 법칙

C<sup>\*</sup>-적분 및 크리프 COD 계산식의 타당성을 검증하기 위해서 다양한 크리프 변형을 법칙에 대한 유한요소 탄성 크리프 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 크리프 법칙은 멱급수 법칙, 1차-2차 크리프 법칙, 그리고  $\theta$ -투영 법칙( $\theta$ -projection law)이다. 해석에 사용된 멱급수 크리프 법칙은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_c = A\sigma^n \quad ; \quad A = 1 \times 10^{-16}, n = 5 \quad (23)$$

여기서, 크리프 변형률 속도( $\dot{\epsilon}_c$ )의 단위는 1/hour이며, 작용 응력의 단위는 MPa이다.

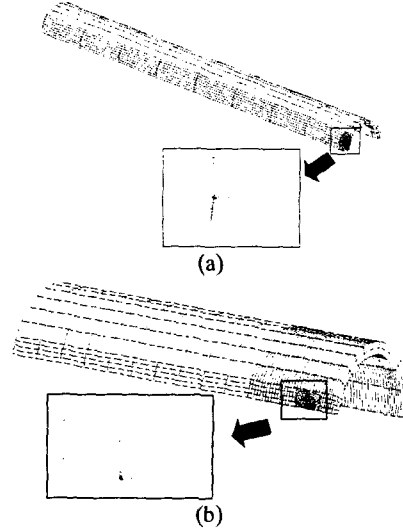
1차-2차 크리프 법칙은 RCC-MR(Design and Construction Rules for Mechanical Components of Fast Breeder Reactor Nuclear Islands)에서 제시한 565°C에서의 일반적인 TP316 스테인리스강에 대한 값<sup>(16)</sup>을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_c = \begin{cases} B\sigma^m t^p & \text{for } t \leq t_{fp} \\ B\sigma^m t_{fp}^p + A\sigma^n(t - t_{fp}) & \text{for } t > t_{fp} \end{cases} \quad (24)$$

$$B = 2.2243 \times 10^{-14}, \quad m = 4.3056, \quad p = 0.44633$$

$$A = 1.7122 \times 10^{-25}, \quad n = 8.20$$

$$t_{fp} = 2.75366 \times 10^{19} \cdot \sigma^{-7.0337}$$



**Fig. 2** Typical FE meshes, employed in the present FE analysis for a pipe with (a) a circumferential through-wall crack and (b) an axial through-wall crack

여기서,  $\epsilon_c$ 는 크리프 변형률이며  $t$ 는 시간(hour), 그리고  $\sigma$ 는 작용 응력(MPa)이다.

$\theta$ -투영 법칙은 일반적인 Cr-Mo-V 페라이트강의 2차-3차 크리프 변형을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_c = \theta_1(1 - e^{-3^{6000}\theta_2 t}) + \theta_3(e^{3^{6000}\theta_4 t} - 1) \quad (25)$$

$$\log \theta_i = a_i + b_i T + c_i \sigma + d_i \sigma T \quad ; \quad i = 1 \sim 4$$

여기서,

$$a_1 = -8.736 \quad b_1 = 0.004604 \quad c_1 = -0.04489 \quad d_1 = 0.6814 \times 10^{-4}$$

$$a_2 = -23.46 \quad b_2 = 0.02225 \quad c_2 = 0.02195 \quad d_2 = -0.1951 \times 10^{-4}$$

$$a_3 = -1.869 \quad b_3 = -0.002034 \quad c_3 = -0.05497 \quad d_3 = 0.799 \times 10^{-4}$$

$$a_4 = -16.43 \quad b_4 = 0.009149 \quad c_4 = -0.04723 \quad d_4 = 0.719 \times 10^{-4}$$

또한  $\epsilon_c$ 는 크리프 변형률,  $\sigma$ 는 작용 응력(MPa),  $t$ 는 시간(hour)이며,  $T$ 는 절대 온도(Kelvin)이다. 식 (25)에서  $\theta_i$ 는 565°C에서의 데이터<sup>(17)</sup>를 사용하여 결정하였다.

#### 3.2 유한요소해석

해석대상은 원주방향 및 축방향 관통균열이 존재하는 배관으로  $R_m/t$ 는 5와 10이다. 원주방향 관통균열의 경우 굽힘 모멘트, 인장하중, 그리고 내압이 작용하는 경우의 3가지를 고려하였으며, 축방향 관통균열의 경우는 내압이 작용하는 경우를 고려하였다. 원주방향 관통균열의 길이는 원주의 12.5%( $\theta/\pi=0.125$ )와 40%( $\theta/\pi=0.4$ )의 두 가지 경우에 대해 해석을 수행하였으며, 축방향 관통균열의 경우는  $\rho=0.5, 1$ 의 두 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 해석 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

**Table 2** Values of the  $\sigma_{ref}$  and  $t_{red}$  for the primary-secondary creep law (Circumferential crack case)

Loading condition	$R_m/t$	$\theta/\pi$	$\sigma_{ref}$ (MPa)	$t_{red}$ (hours)
Bending, Tension	5, 10	0.125	71.71	104484.4
		0.4	55.59	688795.2
Pressure	5, 10	0.125	98.03	10321.6
		0.4	61	346454.4

유한요소 탄성 크리프 해석에는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램<sup>(18)</sup>이 사용되었다. Fig. 2는 각각 해석에 사용된 원주방향 및 축방향 관통균열 배관의 대표적인 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석모델의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 고려하였으며, 사용된 요소는 20절점 등계수 사각주요소(20 nodes isoparametric brick reduced integration element)이다.

하중 조건은 초기에 소성한계하중의 40%에 해당하는 기계적 하중을 가해 탄성 해석을 수행하고, 이후 하중을 일정하게 유지시키면서 시간 의존적 크리프 해석을 수행하였다. 순수 굽힘 모멘트가 작용하는 경우에는 4점 굽힘법을 이용하여 굽힘 모멘트를 작용시켰으며, 내압이 작용하는 경우에는 배관 내부에 작용하는 압력과 배관 끝단에서의 상당 인장하중, 그리고 균열면에 내압의 50%에 해당하는 압력을 동시에 작용시켰다.

먹급수 크리프 법칙을 사용한 경우의 C-적분은 ABAQUS 프로그램에서 자동적으로 계산된다. 반면에 1차-2차 크리프 법칙과  $\theta$ -투영 법칙 등의 일반 크리프 법칙을 사용하여 크리프 해석을 수행하는 경우에는 C-적분을 계산하기 위해 ABAQUS 프로그램의 사용자 정의 함수인 CREEP를 사용하여 해석을 수행하였다.

시간 의존적 C-적분( $C(t)$ )은 시간의 함수로 유한요소해석 결과로부터 쉽게 얻을 수 있다. 초기 크리프 거동의 경우, 크리프 변형률이 균열 구조물을 통해 재분배되는 동안 과도상태 크리프 조건이 발생하며 이때 C-적분은 심한 경로 의존성(path dependence)을 나타낸다. 그러나 크리프 변형의 재분배가 완료되면 정상상태 크리프 조건이 발생하며, 이때 C-적분( $C^*$ -적분)은 경로 독립성(path independence)을 보인다.

$C^*$ -적분을 계산하기 위한 공학적 계산식인 식 (5), 식 (15), 그리고 식 (18)은 정상상태 크리프 조건에서만 유효하므로 유한요소해석 결과와의 비교를 위해서는 크리프 해석시 정상상태 조건이 성립되는 재분배 시간(redistribution time,  $t_{red}$ )의 결정이 매우 중요하다. 먹급수 법칙의 경우 정상상태 크리프 조건에서  $C^*$ -적분은 항상 일정하며,  $t_{red}$ 는 다음과 같이 결정된다.<sup>(2)</sup>

$$t_{red} = \frac{K^2}{EC^*} \quad (26)$$

**Table 3** Values of the  $\sigma_{ref}$  and  $t_{red}$  for the primary-secondary creep law (Axial crack case)

Loading condition	$R_m/t$	$\rho$	$\sigma_{ref}$ (MPa)	$t_{red}$ (hours)
Pressure	5, 10	0.5	72.53	96118.3
		1	68.04	154234.6

**Table 4** Values of the  $\sigma_{ref}$  and  $t_{red}$  for the  $\theta$ -projection creep law (Circumferential crack case)

Loading condition	$R_m/t$	$\theta/\pi$	$\sigma_{ref}$ (MPa)	$t_{red}$ (hours)
Tension	5	0.125	71.71	2660.2
Pressure	5	0.125	98.03	640.6

반면, 일반 크리프 법칙의 경우, 크리프 변형률 속도는 시간의 함수이며, 따라서 정상상태 경로 적분인  $C^*$ -적분도 시간과 함께 변화한다. 따라서 재분배 시간 결정시 식 (26)이 사용될 수 없으며 일반적으로 다음과 같이 탄성 변형률과 크리프 변형률이 같아지는 시간을 재분배 시간인  $t_{red}$ 으로 정의하며  $t > t_{red}$ 이면 정상상태가 이루어진다고 가정한다.<sup>(2)</sup>

$$\epsilon_c(\sigma_{ref}, t_{red}) = \epsilon_e = \frac{\sigma_{ref}}{E} \quad (27)$$

Table 2~Table 4에 일반 크리프 법칙에 대해 계산된 재분배 시간을 정리하여 나타내었다.

### 3.3 해석 결과

Fig. 3~Fig. 4는 각각 굽힘 모멘트와 인장하중이 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대해 먹급수 크리프 법칙을 적용하여 구한  $C^*$ -적분과 COD 변화율을 나타낸 것이다.  $C^*$ -적분은 유한요소해석으로 구한  $C^*$ -적분( $C^*_{FE}$ )으로 무차원화하였다. 또한 시간은  $t_{red}$ 로 무차원화하였으며, COD 변화율은 탄성 COD인  $\delta_0$ 로 무차원화하였다.

앞서 언급한 바와 같이  $C^*$ -적분을 구하기 위한 식 (5), 식 (15), 그리고 식 (18)은 정상상태 크리프가 발생하는 영역( $t > t_{red}$ )에만 적용이 가능하기 때문에 정상상태에 대해서만 유한요소해석(FE results), 기존의 참조응력법(RS method), 개선된 참조응력법(ERS method), 그리고 GE/EPRI법으로 구한 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에서 먹급수 법칙에 대해 GE/EPRI법으로 구한  $C^*$ -적분은 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 앞서 언급한 바와 같이 GE/EPRI법은 유한요소해석으로 구한 소성영향함수를 사용하기 때문에 이상화된 먹급수 법칙의 경우에는 계산 결과가 유한요소해석 결과와 비교적 잘 일치한다. 기존의 참조응력법은 굽힘 모멘트가 작용하는 경우에 대해서는 잘 일치하였으나 인장하중이 작용하는 경우에는 유한요소해석 결과에 비해 작게 나타났다. 또한 저자들이 새롭게 제시한 ERS법은 굽힘 모멘트가 작용하는 경우는 유한요소해석 결과보다 30%정도 크

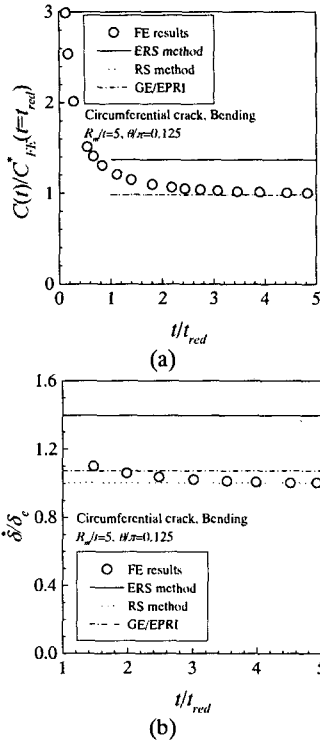


Fig. 3 Comparison of the FE results with the estimation results for the power-law creep law

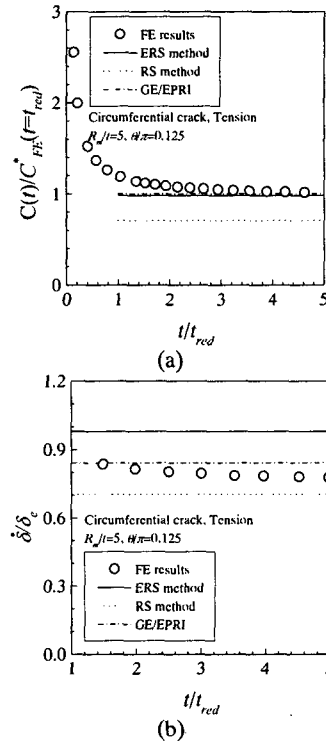


Fig. 4 Comparison of the FE results with the estimation results for the power-law creep law

게 나타났으나 인장하중이 작용하는 경우에 대해서는 잘 일치하였다. Fig. 4에서 COD 변화율의 경우는  $C^*$ -적분에 비해 차이의 정도가 크게 나타났으나 이는 전체 COD값이 아닌 변화율로 나타내어 그 차이의 정도가 커진 것이며 시간에 대해 적분하여 COD값을 비교하면 유한요소해석 결과와 잘 일치한다. 지면 관계상 나타내지는 못했으나 다른 모든 경우에 있어서 ERS법으로 구한 결과는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으나 기존의 참조응력법으로 구한 결과는 유한요소해석 결과보다 작게 나타났다.

Fig. 5와 Fig. 6은 일반 크리프 법칙인 1차-2차 크리프 법칙에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5는 내압이 작용하는 원주방향 관통균열에 대한 결과이며, Fig. 6은 내압이 작용하는 축방향 관통균열 배관에 대한 결과이다. GE/EPRI법은 일반 크리프 법칙에는 적용할 수 없으므로 유한요소해석 결과, 기존의 참조응력법 그리고 ERS법으로 구한 결과만을 비교하여 나타내었다. 해석 결과, 저자들이 새롭게 제시한 ERS법으로 구한 결과는 모든 경우에 있어서 기존의 참조응력법보다 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. Fig. 7과 Fig. 8은  $\theta$ -투영 법칙에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 1차-2차 크리프 법칙의 경우와 동일하게 ERS법으로 구한  $C^*$ -적분과 COD 변화율은 기존의 참조응

력법에 비해 더 정확하였다.

Fig. 9는 굽힘 모멘트가 작용하는 원주방향 관통균열 배관에 대한 해석 결과로 1차-2차 크리프 법칙을 사용한 경우이다. Fig. 5~Fig. 8은 배관의  $R_m/t$ 가 5인 경우에 대한 결과이나, Fig. 9는  $R_m/t$ 가 10인 경우에 대한 결과이다. 그림에 나타낸 바와 같이 ERS법으로 구한 결과는 기존의 참조응력법에 비해 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 비교 결과 ERS법으로 구한 결과는 배관 및 균열의 형상, 하중 조건, 크리프 변형 법칙 등에 관계없이 모든 경우에 있어서 유한요소해석 결과와 잘 일치하였으며, 결과의 경향도 안정적이었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고온에서 운전되는 원주방향 및 축방향 관통균열 배관의  $C^*$ -적분과 COD 계산을 위한 기존의 공학적 계산식(GE/EPRI법, 참조응력법)과 저자들이 새롭게 제시한 ERS법을 3차원 유한요소 탄성 크리프 해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

크리프-변형률 법칙에 따른 정확성을 평가하기 위해 멱급수 법칙과 일반 크리프 법칙의 3가지 크리프 법칙이 사용되었으며, 배관 및 균열의 형상과 하중조건도 변화시키며 해석을 수행하였다.

비교 결과, 알려진 바와 같이 멱급수 법칙에 대

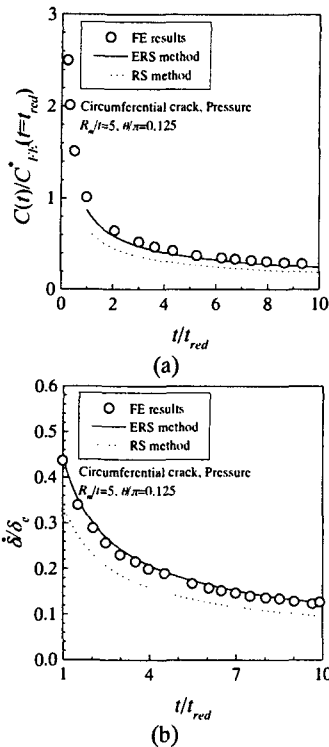


Fig. 5 Comparison of the FE results with the estimation results for the primary-secondary creep law

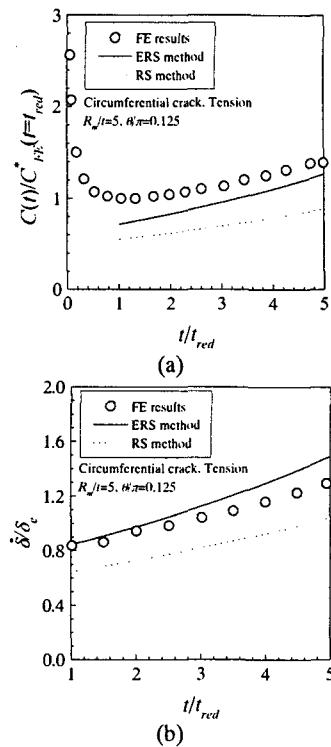


Fig. 7 Comparison of the FE results with the estimation results for the  $\theta$ -projection creep law

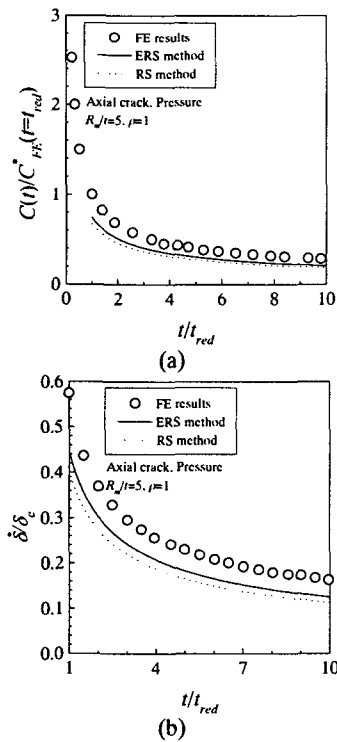


Fig. 6 Comparison of the FE results with the estimation results for the primary-secondary creep law

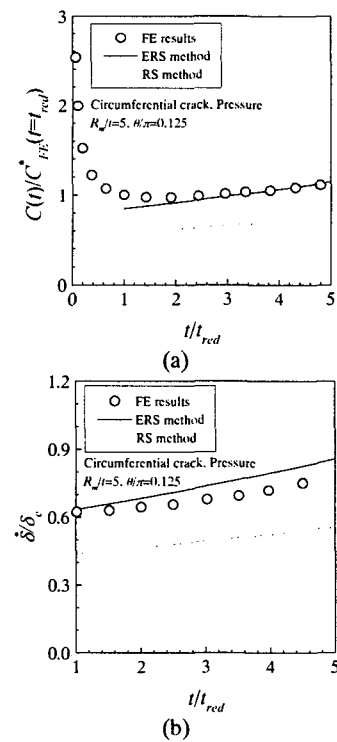


Fig. 8 Comparison of the FE results with the estimation results for the  $\theta$ -projection creep law

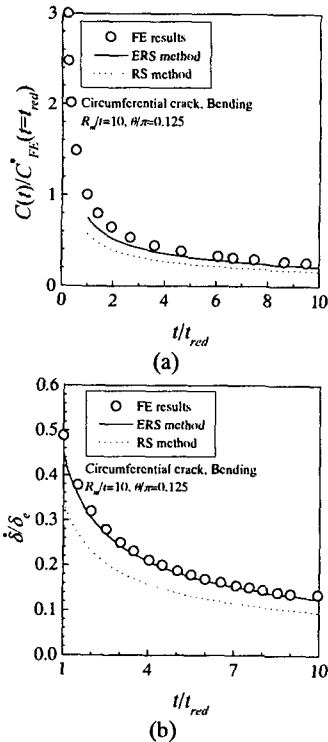


Fig. 9 Comparison of the FE results with the estimation results for the primary-secondary creep law

해 GE/EPRI법으로 구한 결과는 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 그러나 저자들이 새롭게 제시한 ERS법으로 구한 결과는 멱급수 법칙 뿐만 아니라 GE/EPRI법을 적용할 수 없는 일반 크리프 법칙의 경우에도 해석 조건에 관계없이 기존의 참조응력법보다 정확하였으며 안정적이었다. 따라서 고온 배관에 대한  $C^*$ -적분 및 COD 계산시 저자들이 제시한 ERS법을 적용하면 기존의 공학적 계산식보다 정확하게 건전성을 평가할 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Riedel, H., 1987, "Fracture at High Temperature," Springer-Verlag, Berlin.
- (2) Webster, G.A. and Ainsworth, R.A., 1994, "High Temperature Component Life Assessment," Chapman & Hall, London.
- (3) Kumar, V., German, M., Wilkening, W., Andrews, W., deLorenzi, H. and Mowbray, D., 1984, "Advances in Elastic-Plastic Fracture Analysis," EPRI Report NP-

- 3607.
- (4) Kumar, V. and German, M.D., 1988, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders," EPRI Report NP-5596.
- (5) Ainsworth, R.A., 1984, "The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633-642.
- (6) "R5: Assessment Procedure for the High Temperature Responses of Structures, Issue 2," British Energy Generation Ltd., 1998.
- (7) "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Revision 3, British Energy Generation Ltd., 1999.
- (8) 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, No. 2, pp. 233-247.
- (9) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "New Engineering Estimation Method of  $J$ -Integral and COD for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 3, pp. 548-553.
- (10) Huh, N.S., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2001, "Application of Enhanced Reference Stress Method to Nuclear Piping LBB Analysis: Finite Element Validation," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 4, pp. 741-747.
- (11) Huh, N.S., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2002, "An Engineering Method for Non-Linear Fracture Mechanics Analysis of Circumferential Through-Wall Cracked Pipes Under Internal Pressure," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 6, pp. 1099-1106.
- (12) Huh, N.S., Park, Y.J., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2003, "New Engineering  $J$  and COD Estimation Methods for Axial Through-Wall Cracked Pipes," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 2, pp. 239-246.
- (13) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2001, "Crack Opening Analysis of Complex Cracked Pipes," *International Journal of Fracture*, Vol. 111, No. 1, pp. 71-86.
- (14) Kim, Y.J., Huh, N.S. and Kim, Y.J., 2002, "Reference Stress Based Elastic-Plastic Fracture Analysis for Circumferential Through-Wall Cracked Pipes under Combined Tension and Bending," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, No. 3, pp. 367-388.
- (15) Shim, D.J., Huh, N.S., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2003, "Plastic Limit Pressure Solutions for Cracked Pipes Using 3-D Finite Element Method," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 1, pp. 26-33.
- (16) RCC-MR, 1985, "Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Island," AFCEN, Paris.
- (17) Evans, R.W. and Wilshire, B., 1985, "Creep of Metals and Alloys," Institute of Metals, London.
- (18) "ABAQUS User's Manual - Ver. 5.8," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., 1999.