

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.9.949

**복합응력이 작용하는 균열 배관에 대한 천이 크리프 조건에서의  $C(t)$ -적분 예측 (I)**  
 - 탄성-크리프 -

송 태 광\* · 김 윤 재 †

(2009년 4월 20일 접수, 2009년 7월 24일 수정, 2009년 8월 3일 심사완료)

**Estimations of the  $C(t)$ -Integral in Transient Creep Condition for Pipe with Crack Under Combined Mechanical and Thermal Stress (I)**

- Elastic-Creep -

Tae-Kwang Song and Yun-Jae Kim

**Key Words :**  $C(t)$ -Integral( $C(t)$ -적분), Crack(균열), Transient Creep Condition(천이 크리프 조건), Combined Mechanical and Thermal Stress(기계응력 및 열응력의 복합응력), Elastic Creep(탄성 크리프)

**Abstract**

The  $C(t)$ -integral describes amplitude of stress and strain rate field near a tip of stationary crack under transient creep condition. Thus the  $C(t)$ -integral is a key parameter for the high-temperature crack assessment. Estimation formulae for  $C(t)$ -integral of the cracked component operating under mechanical load alone have been provided for decades. However, high temperature structures usually work under combined mechanical and thermal load. And no investigation has provided quantitative estimates for the  $C(t)$ -integral under combined mechanical and thermal load. In this study, 3-dimensional finite element analyses were conducted to calculate the  $C(t)$ -integral of elastic-creep material under combined mechanical and thermal load. As a result, redistribution time for the crack under combined mechanical and thermal load is re-defined through FE analyses to quantify the  $C(t)$ -integral. Estimates of  $C(t)$ -integral using this proposed redistribution time agree well with FE analyses results.

기호설명

<p><math>C(t)</math> : 천이영역에서의 크리프 매개변수 (non-steady creep characterizing parameter)</p> <p><math>C^*</math> : 광범위크리프에서의 크리프 매개변수 (wide-spread creep characterizing parameter)</p> <p><math>J</math>-integral : <math>J</math>-적분</p> <p><math>K</math> : 응력확대계수</p> <p><math>K_I^P, K_I^S, K_I^{P+S}</math> : 기계하중, 열하중, 기계하중 및 열하중의 복합하중에 대한 응력확대계수</p>	<p><math>L_r</math> : 소성붕괴에 대한 근접성, 식 (12)</p> <p><math>\sigma_{ref}</math> : 참조하중, 식 (12)</p> <p><math>t</math> : 크리프 시간</p> <p><math>t_{red}</math> : 재분배 시간, 식 (10)</p> <p><math>\tau</math> : 무차원화 시간, 식 (9)</p> <p><math>n, B</math> : 크리프 응력 지수 및 재료상수, 식 (2)</p> <p><math>\beta</math> : 열응력 크기에 대한 특성 변수, 식 (13)</p> <p><math>E, E'</math> : 탄성계수, 평변 변형률 조건에서의 <math>E</math></p> <p><math>\sigma_o</math> : 항복강도, 식 (12)</p> <p><math>\varepsilon^c, \dot{\varepsilon}^c</math> : 크리프 변형률, 크리프 변형률 속도</p> <p><math>r</math> : 배관의 평균 반경, Fig. 1</p> <p><math>w</math> : 배관의 두께, Fig. 1</p> <p><math>a</math> : 균열의 깊이, Fig. 1</p> <p><math>\theta</math> : 균열의 원주 크기의 반각, Fig. 1</p>
--	--

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학부  
 E-mail : kimy0308@korea.ac.kr  
 TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)929-1718  
 \* 고려대학교 대학원

1. 서 론

$C(t)$ -적분 및  $C^*$ -적분은 크리프 조건에서 정지 균열(stationary crack) 부근의 응력장 및 변형률속도장(strain rate field)의 크기를 나타낸다.<sup>(1)</sup> 특히  $C(t)$ -적분은 천이 크리프 조건(transient creep condition)에 대한 매개 변수이며  $C^*$ -적분은 광범위 크리프 조건(wide-spread creep condition)에 대한 매개 변수이다. 따라서  $C(t)$ -적분 및  $C^*$ -적분은 크리프 변형이 나타나는 고온균열 구조물 평가 시 중요한 매개 변수가 된다.<sup>(1,2)</sup>

재료의 크리프 물성은 시간 및 응력에 따라 복잡하게 나타나지만 일반적으로 멱급수 크리프 법칙(power law creep)을 이용하여 간단하게 나타낼 수 있다. 이 때, 멱급수 크리프 법칙은 멱급수 소성 법칙과 유사하므로<sup>(3)</sup>  $C^*$ -적분은 GE/EPRI 방법<sup>(4)</sup> 및 참조응력법<sup>(5)</sup>을 통해 쉽게 구할 수 있으며 지금까지 많은 연구가 수행되었다.<sup>(6-9)</sup>

크리프 천이 영역에서의  $C(t)$ -적분은  $C^*$ -적분에 비해 크게 나타난다. 따라서 천이 크리프 조건에서의 균열 성장 등을 예측하기 위해서는 정확한  $C(t)$ -적분 평가가 필요하며 지금까지 다양한 평가식이 제시되었다. 그러나 대부분의 연구는 기계하중에 대한 크리프 특성에 제한되었으며,<sup>(10-15)</sup> 특히 일반적인 고온 균열 구조물이 기계하중 및 열하중의 복합하중을 받고 있는 점을 감안한다면 열하중에 대한 특성이 고려된 평가가 필요함을 알 수 있다. 복합응력에 대한 크리프 평가는 Joch, Ainsworth<sup>(16)</sup> 및 Lei<sup>(17)</sup> 등에 의해 수행되었다. 그러나 Joch 및 Ainsworth의 연구는 복합하중에 대한 정성적인 분석에 국한되었으며 Lei의 평가법은 Z-계수를 필요로하나 Z-계수에 대한 직접적인 평가법을 제시하지 못하였다.

본 연구에서는 복합하중을 받고 있는 탄성-크리프 재료에 대한  $C(t)$ -적분을 예측하였으며 2 차 하중의 영향을 정량화하였다. 이를 위해 유한요소 해석을 통해 다양한 크기의 기계하중 및 열하중을 고려하였다. 2 장에서  $C(t)$ -적분에 대한 기존 예측식을 확인할 수 있으며 3 장에서 유한요소 해석에 대한 소개, 4 장에서는 연구결과 및 5 장에서 결론을 확인할 수 있다. 복합하중을 받고 있는 탄-소성-크리프 재료에 대한 연구 결과는 동반논문에서 확인할 수 있다.<sup>(18)</sup>

2. 기계하중에 대한  $C(t)$ -적분 예측

크리프 구조물의  $C(t)$ -적분은 식 (1)과 같이 영

역 적분을 통해 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$C(t) = \int_{\Gamma \rightarrow 0} \left\{ \dot{w} dy - \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} n_j ds \right\} \quad (1)$$

여기서  $x, y$  는 균열면이  $y=0$  인 직교 좌표계를 나타내며  $\Gamma$ 는 균열끝단을 시계반대방향으로 둘러싸는 영역 및  $ds$  는  $\Gamma$ 에서의 단위 길이를 나타낸다.  $\dot{w}$  은 변형 에너지 밀도 변화율(strain energy density rate)을 나타내며 식 (2)와 같이 멱급수 크리프 재료를 가정할 경우 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}^c = B \sigma^n \quad (2)$$

$$\dot{w} = \left( \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij}^e + \frac{n}{n+1} \dot{\epsilon}_{ij}^c \right) \sigma_{ij} \quad (3)$$

여기서  $B$  및  $n$  은 재료 상수이며 위첨자  $e$  는 탄성을,  $c$  는 크리프를 나타낸다. 그리고 천이 영역에서의  $C(t)$ -적분은 일반적으로 경로 의존성을 나타내므로 식 (1)에서와 같이  $\Gamma \rightarrow 0$ 에서의 적분값을 사용하게 된다.

광범위 크리프 조건에서( $t \rightarrow \infty$ )  $C(t)$ -적분은 식 (4)와 같이  $C^*$ 가 된다.

$$C(t) = C^* \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (4)$$

천이 크리프 조건에서는  $C(t) > C^*$ 를 만족하며 Riedel 및 Rice 는 기계하중을 받는 탄성 크리프 재료에 대해 아주 짧은 크리프 시간( $t \rightarrow 0$ )에 대한  $C(t)$ -적분을 식 (5)와 같이 제안하였다.<sup>(10)</sup>

$$C(t) = \frac{K^2}{(n+1)E't} = \frac{J_0}{(n+1)t} \quad \text{as } t \rightarrow 0 \quad (5)$$

여기서  $J_0$  는 크리프 변형이 발생하는 시점( $t=0$ )의  $J$ -적분으로서 응력확대계수( $K$ )와의 관계는 식 (6)과 같다.

$$J_0 = \frac{K^2}{E'} \quad (6)$$

Ehlers 및 Riedel<sup>(11)</sup>은 천이 크리프 영역 및 광범위 크리프 영역에서의  $C(t)$ -적분을 식 (4) 및 (5)의 단순 합인 형태로서 식 (7)과 같이 제안하였으며 Ainsworth 및 Budden<sup>(12)</sup>은 식 (7)에 비해 천이구간 예측을 개선한 식을 제시하였으며 식 (8)과 같다.

$$\frac{C(t)}{C^*} = 1 + \frac{1}{(n+1)\tau} \quad (7)$$

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{(1+\tau)^{n+1}}{(1+\tau)^{n+1} - 1} \quad (8)$$

여기서  $\tau$ 는 무차원화된 시간으로서 식 (9)와 같다. 식 (9)에서  $t_{red}$  은 응력 재분배 시간으로서 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{t}{t_{red}} \quad (9)$$

$$t_{red} = \frac{K^2}{E'C^*} = \frac{J_o}{C^*} \quad (10)$$

Kim et al.은 유한요소 해석을 통해 다양한 균열 형상을 고려한 결과 식 (8)은  $n$  에 대해 민감하지 않으며  $n=3.5$  을 사용할 수 있음을 제시하였으며<sup>(15)</sup> 제시한 평가식은 식 (11)과 같다.

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{(1+\tau)^{4.5}}{(1+\tau)^{4.5} - 1} \quad (11)$$

### 3. 복합하중에 대한 유한요소 해석

#### 3.1 해석 대상

Fig. 1 은 본 연구에서 고려한 원주 방향 균열이 있는 배관으로서 그림에서와 같이 360° 내면 표면 균열 및 표면균열을 고려하였다.

#### 3.2 작용 하중 (기계 응력)

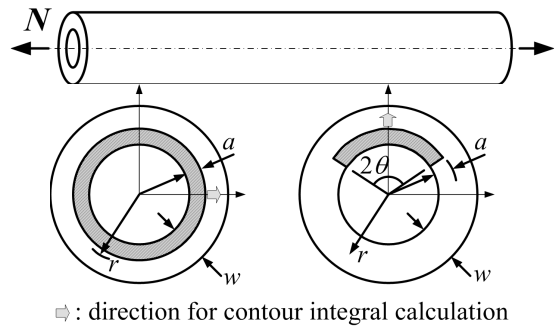
균열 배관에 작용하는 기계 하중으로는 Fig. 1 에서와 같이 축 방향 인장하중을 고려하였다. 배관에 작용하는 기계하중의 크기는 R6 에서 사용되는 매개변수인  $L_r$  을 통해 정의하였으며 식 (12)와 같다.<sup>(6)</sup>

$$L_r = \frac{N}{N_{OR}} = \frac{N}{\gamma N_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_o} \quad (12)$$

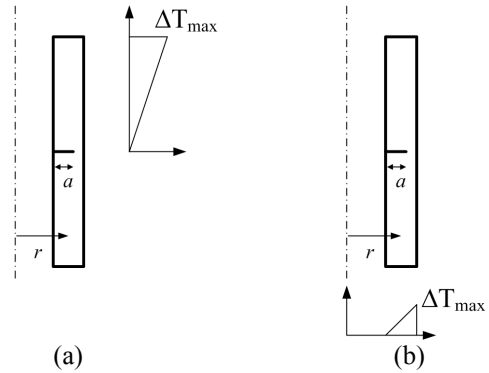
일반적으로  $L_r$  은 균열 구조물의 한계하중( $N_L$ )을 통해 정의하며 이를 통해 참조하중을 정의할 수 있다. 그러나 이와 같은 정의는 부정확한 참조하중 결과를 나타낼 수 있으므로 식 (12)와 같이 보정계수( $\gamma$ )를 통해 최적한계하중( $N_{OR}$ )을 정의하여 참조하중을 구할 수 있다.<sup>(19,20)</sup> 보정계수는 탄소성  $J$ -적분 계산을 통해 구할 수 있으며, 구체적인 과정은 본 논문의 동반 논문<sup>(18)</sup>에서 확인할 수 있으며 Table 1 에서 각각의 균열 및  $n$  에 대한 보정계수를 확인할 수 있다.

**Table 1** Correction factor for optimized reference stress

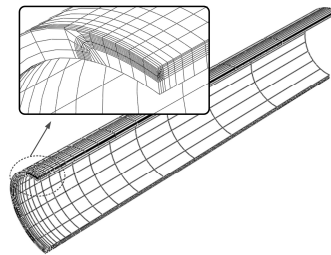
$\theta/\pi$	$a/t$	$n=5$	$n=10$
0.125	0.3	0.79	0.90
	0.5	0.80	0.91
	1.0	0.76	0.86
1.0	0.3	1.03	1.14
	0.5	1.16	1.28



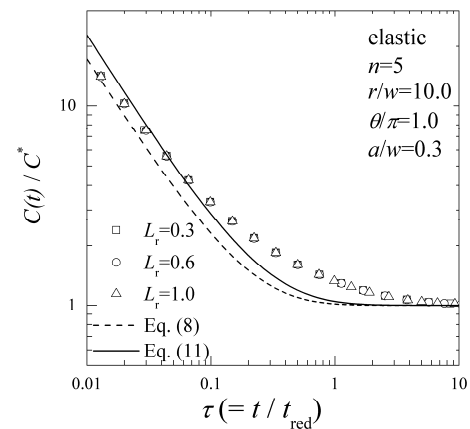
**Fig. 1** Schematic illustration for pipe with circumferential crack under tension. Internal fully circumferential surface crack and part-through surface crack are shown



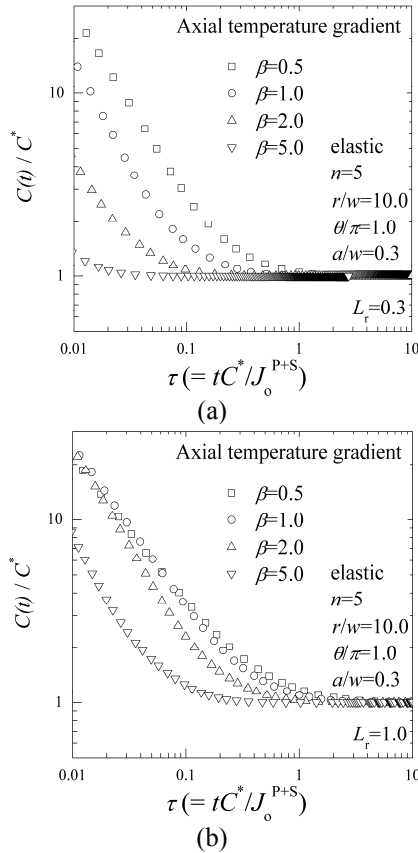
**Fig. 2** Schematic illustration for thermal load type. (a) Axial temperature gradient and (b) radial temperature gradient



**Fig. 3** FE mesh for part-through surface crack



**Fig. 4** Comparison of finite element results with proposed solutions for C(t)-integral under mechanical stress alone



**Fig. 5** Finite element results for  $C(t)$ -integral under combined mechanical and thermal stress.  $J$ -integral under combined mechanical and thermal stress is used to define re-distribution time. (a) is for  $L_r=0.3$  and (b) is for  $L_r=1.0$

3.3 작용 하중 (열 응력)

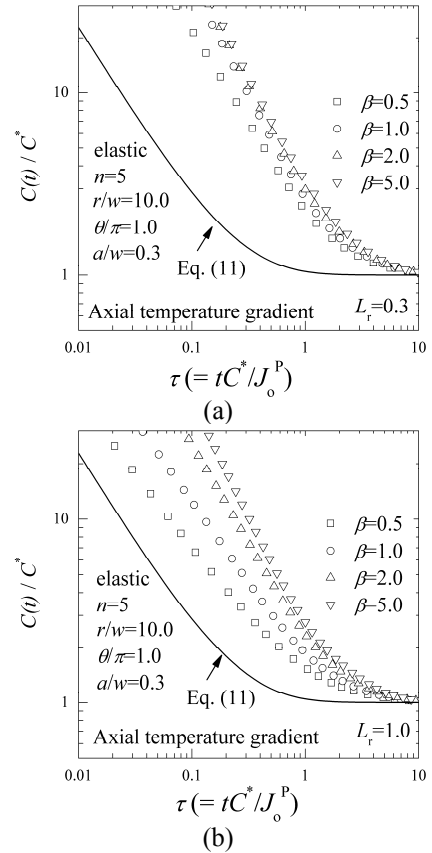
배관에 작용하는 열응력은 균열을 열어주는 온도분포를 고려하였으며 Fig. 2 에서와 같이 축 방향 온도 구배(axial temperature gradient) 및 방사형 온도 구배(radial temperature gradient)를 고려하였다. 열응력 크기( $\beta$ )는 식 (13)과 같이 정의할 수 있으며<sup>(5,21)</sup> 본 연구에서는  $\Delta T_{max}$  를 적절히 변화시킴으로써  $\beta=0.5, 1.0, 2.0, 5.0$  을 고려하였다.

$$\beta = \frac{K_I^S}{K_I^P / L_r} \tag{13}$$

식 (13)을 포함한 본 논문의 수식에서 위첨자 “S”는 열하중을 의미하며 “P”는 기계하중, “P+S”는 기계하중 및 열하중의 복합하중을 의미한다.

3.4 재료 물성

본 연구에서는 탄성-크리프 재료를 고려하였으며 크리프 재료 구성식은 식 (2)와 같다. 크리프 응력 지수( $n$ )는  $n=5, 10$  을 고려하였으며 크리프 재료 상수( $B$ )는 탄-소성-크리프 문제와의 연관성을 고려하여  $n=5$  및  $10$  에 대해  $B=1.0 \times 10^{-15}$  및



**Fig. 6** Finite element results for  $C(t)$ -integral under combined mechanical and thermal stress.  $J$ -integral under mechanical stress alone is used to define re-distribution time. (a) is for  $L_r=0.3$  and (b) is for  $L_r=1.0$

$3.4 \times 10^{-28}$  을 사용하였다.<sup>(18)</sup>

3.5 유한요소 해석

Fig. 3 은 본 연구에서 고려한 표면균열에 대한 유한요소 망을 나타낸다. 표면균열에 대한 요소는 대략 15,000 개가 사용되었으며 요소 크기에 대한 민감도 해석을 통해 균열 끝단에 요구되는 최소 요소 크기를 사용하였다.

4. 복합하중에 대한 탄성  $C(t)$ -적분 예측

4.1 기계하중에 대한  $C(t)$ -적분 검증

Fig. 4 는 기계하중을 받고 있는 배관에 대한 탄성-크리프 유한요소 해석 결과 및 기존 식과의 비교를 나타낸다.  $n=5$  인 크리프 재료에 대한 해석 결과 그림에서와 같이 유한요소 해석 및 기존 제안식은 잘 일치하고 있으며 식 (8)에 비해 식 (11) 이 해석 결과와 잘 일치하였다. 이와 같은 경향은  $n=10$  인 재료에서도 확인할 수 있었다.

4.2 복합 하중에 대한 C(t)-적분 경향

Fig. 5 와 6 은 축 방향 온도 구배를 받고 있는 균열 배관에 대한 C(t)-적분 결과를 나타낸다. 각 그림은 같은 조건에서의 C(t)-적분 결과를 나타낸 것으로서 2 가지 크기의 기계하중(L<sub>r</sub>=0.3, 1.0) 및 4 가지 크기의 열 하중(β=0.5, 1.0, 2.0, 4.0)을 고려하였다. 다만 Fig. 5 와 6 은 서로 다른 재분배 시간을 사용하여 C(t)-적분을 정의하였다. Fig. 5 는 기계하중 및 열하중에 의한 J-적분을 사용하였으며, Fig. 6 은 기계하중에 의한 J-적분을 사용하여 식 (10)을 통해 재분배 시간을 정의하였다. 이 때, Fig. 5 와 6 을 통해 알 수 복합하중에 대한 C(t)-적분의 경향은 다음과 같다.

- 1) Fig. 5 와 6 에서 복합하중에 대한 C(t)-적분은 L<sub>r</sub> 및 β의 영향이 복합적으로 나타난다.
- 2) Fig. 6 에서 L<sub>r</sub> 이 증가하면 복합하중에 대한 C(t)/C\*값과 기계하중에 대한 기존 예측식(식 (11))과의 차이가 줄어든다.
- 3) Fig. 5 에서 β가 증가할수록 낮은 τ값에서 C(t)-적분이 수렴하는 것을 알 수 있다. 그러나 2 차 하중은 알려진 바와 같이 C\*-적분에 영향을 미치지 않으며<sup>(16)</sup> J<sub>0</sub> 값에만 영향을 미친다. β가 증가하면 식 (10)에서와 같이 t<sub>red</sub> 이 증가하므로 실제 C(t)-적분이 C\*로 수렴하는 시간은 증가한다.<sup>(16)</sup> 이와 같은 특성은 크리프 시간을 1 차 하중만 작용한 경우에 대한 J-적분(J<sub>0</sub><sup>P</sup>)값을 통해 t<sub>red</sub> 을 정의한 Fig. 6 에서 확인할 수 있다.
- 4) Fig. 5 에서 β에 상관없이 천이구간에서의 C(t)/C\*의 기울기는 일정하다. 이는 식 (5)에서와 같이 C(t)/C\* 값이 t→0 에서 점근 (asymptote) 특성이 유지됨을 의미한다.

이와 같이 복합응력이 균열 구조물의 C(t)-적분에 미치는 영향을 고려한다면 t<sub>red</sub> 을 재정의 함으로써 유한요소 해석 결과와 일치하는 평가식을 유도할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 복합 하중에 대한 C(t)-적분 예측

복합하중을 받고 있는 탄성 균열 구조물에 대한 응력확대계수는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(5)</sup> 이 때, 식 (13)을 통해 식 (14)는 식 (15)와 같이 변형할 수 있으며 따라서 복합하중을 받고 있는 균열구조물의 J-적분은 식 (16)과 같이 1 차 하중에 대한 응력확대계수 및 β, L<sub>r</sub> 의 함수로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 다양한 L<sub>r</sub> 및 β에 대한 유한요소 해석 결과 복합하중에 대한 무차원 시간 (τ<sub>red</sub><sup>P+S</sup>)을 식 (17)과 같이 제안하였다.

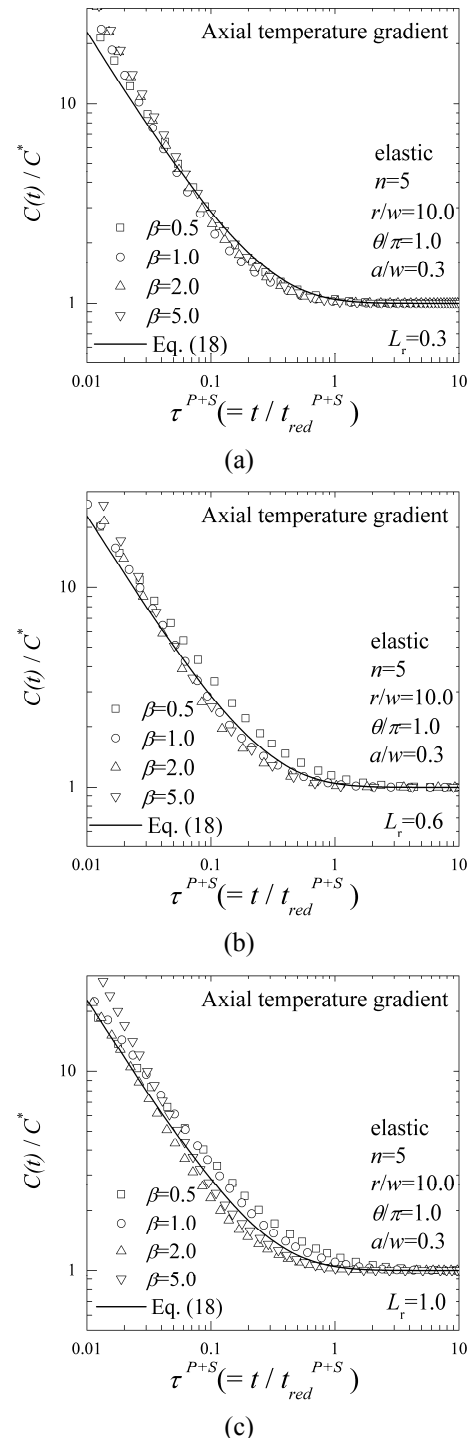
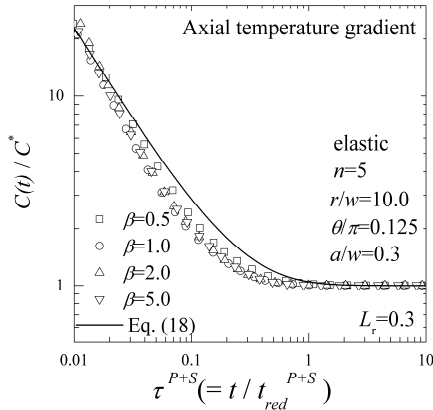
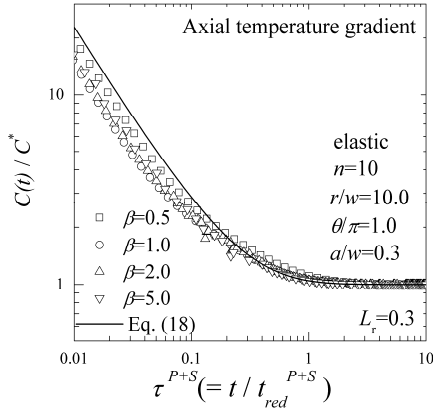


Fig. 7 Finite element results for C(t)-integral under combined mechanical and thermal stress for (a) L<sub>r</sub>=0.3, (b) L<sub>r</sub>=0.6 and (c) L<sub>r</sub>=1.0. Note that normalized time is defined by proposed equation, see Eq. (18)

이는 (1+β/L<sub>r</sub>)<sup>2</sup>=10 을 기준으로 식 (16)의 적용성이 제한됨을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 복합하중에 대한 C(t)-적분을 식 (18)과 같이 제안하였다.

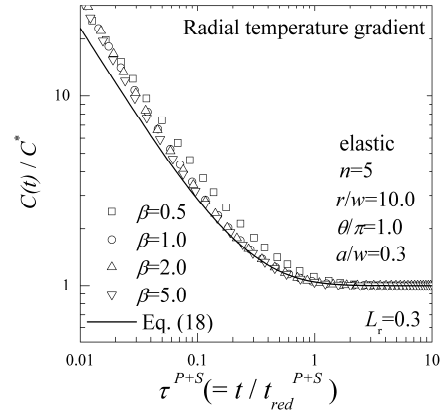


(a)

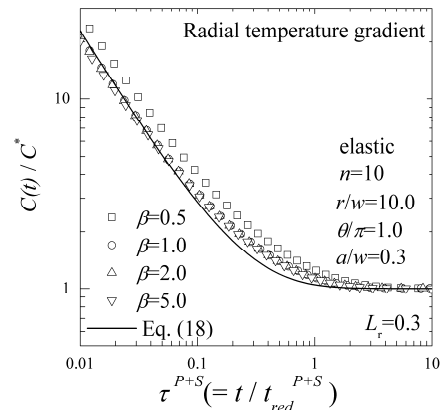


(b)

**Fig. 8** Applicability of proposed normalized time for combined mechanical and thermal load to (a) another crack geometry of  $\theta/\pi=0.125$  and  $a/w=0.3$  and (b) another creep stress index,  $n=10$



(a)



(b)

**Fig. 9** Applicability of proposed normalized time for combined mechanical and thermal load to another type of thermal load, radial temperature gradient. (a) is for  $n=5$  and (b)  $n=10$

$$K_I = K_I^P + K_I^S \tag{14}$$

$$K_I = K_I^P \left( 1 + \frac{\beta}{L_r} \right) \tag{15}$$

$$J_o = \frac{K_I^2}{E'} = \frac{(K_I^P)^2}{E'} \left( 1 + \frac{\beta}{L_r} \right)^2 \tag{16}$$

$$t_{red}^{p+s} = \begin{cases} \frac{J_o}{C^*} = \frac{(K^P)^2}{E'C^*} \left[ 1 + \frac{\beta}{L_r} \right]^2 & \text{for } \left( 1 + \frac{\beta}{L_r} \right)^2 < 10 \\ 10 \frac{J_o^p}{C^*} = 10 \frac{(K^P)^2}{E'C^*} & \text{for } \left( 1 + \frac{\beta}{L_r} \right)^2 \geq 10 \end{cases} \tag{17}$$

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{(1 + \tau^{p+s})^{4.5}}{(1 + \tau^{p+s})^{4.5} - 1} \quad \text{with } \tau^{p+s} = \frac{t}{t_{red}^{p+s}} \tag{18}$$

Fig. 7 은 복합하중을 받고 있는 균열배관에 대해 식 (18) 및 유한요소해석 결과를 보여준다. 축방향 온도 구배를 고려하였으며 다양한 기계하중 크기 ( $L_r=0.3, 0.6, 1.0$ ) 및 열하중 크기 ( $\beta=0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ )를 고려하였다. 이 때,  $r/w=10, \theta/\pi=1.0, a/t=0.3$  인  $360^\circ$  내면 표면균열에 대해 본 연구에서 제안한  $C(t)$ -적분 평가식(식 (18))은 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8(a)는  $L_r=0.3$  및 축방향 온도구배를 받고 있는 배관에서  $\theta/\pi=0.125, a/w=0.3, n=5$  인 표면 균열 배관에 대한  $C(t)$ -적분결과를 보여주며 Fig. 8(b)는  $\theta/\pi=1.0, a/w=0.3, n=10$  인 균열 배관에 대한  $C(t)$ -적분 결과를 보여준다. 그림에서와 같이 제안식 (18)은 표면균열 및  $n=10$  에서도 적용가능하였다.

Fig. 9 는  $L_r=0.3$  및 방사형 온도구배를 받고 있는 배관에서의  $C(t)$ -적분 결과로서  $n$  에 상관없이

제안식이 유한요소 해석 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 기계하중 및 열하중의 복합하중을 받고 있는 원주방향 균열 배관에 대한 탄성-크리프 해석을 수행하였다. 본 논문의 결과는 다음과 같다.

(1) 복합하중에서의 C(t)-적분은  $L_r$  및  $\beta$ 의 영향이 복합적으로 나타났다.

(2) 복합하중이 작용하여도  $\beta$ 에 상관없이  $t \rightarrow 0$ 에서 C(t)-적분의 점근특성은 유지된다. 또한  $t \rightarrow \infty$ 에서 복합하중에 의한 C(t)-적분은 기계하중에 의한 C\*-적분과 동일함을 확인하였다.

(3) 1) 및 2)와 같은 결과를 바탕으로 복합하중을 받고 있는 균열 구조물에 대한 C(t)-적분은 무차원 시간을 재정의 함으로써 정량적인 평가가 가능하다. 복합하중을 받는 균열구조물의 C(t)-적분은 식 (17) 및 (18)과 같다.

(4) 본 연구에서 제안한 C(t)-적분 평가식은 다양한 기계하중 및 열하중 크기, 균열 종류 및 크리프 재료에 대해서 유한요소 해석 결과와 잘 일치하였다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(R01-2008-000-11891-0) 지원으로 수행 되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Webster, G. A., Ainsworth, R. A., 1994, "High Temperature Component Life Assessment," Chapman & Hall
- (2) R5: An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures. Revision 2, British Energy, 2003.
- (3) Miller, A. G., 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.
- (4) Kumar, V., German, M. D. and Shih C. F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic Plastic Fracture Analysis," EPRI report, No. 1931.
- (5) British Energy Generation Ltd., 2007, "R6:Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *Revision 4*
- (6) Kim, J. S., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2002, Estimation

- of C\*-Integral for Defective Components with General Creep Deformation Behaviors," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 5, pp. 795~802.
- (7) Huh, N. S., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2003, "Creep Fracture Mechanics Analysis for Through-Wall Cracked Pipes Under Widespread Creep Condition," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 6, pp. 890~897.
- (8) Nikbin, K. M., Webster, G. A. and Turner, C. E., 1976, "Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking, Cracks and Fractured," ASTM STP 601, pp. 47~62.
- (9) Harper, M. P., Ellison, E. G., 1977, "The Use of the C\* Parameter in Predicting Creep Crack Propagation Rates," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 12, pp. 167~199.
- (10) Riedel, H., Rice, J. R., 1980, "Tensile Cracks in Creeping Solids," *Fracture Mechanics : Twelfth Conference*, ASTM STP 700, pp. 112-130.
- (11) Ehlers, R., Riedel, H., 1981, "A Finite Element Analysis of Creep Deformation in a Specimen Containing a Macroscopic Crack," *In Proc. Fifth Int. Conf. on Fracture (Edited by D. Francois)*, Vol. 2, pp. 691~698, Pergamon Press, Oxford.
- (12) Ainsworth, R. A., Budden, P. J., 1990, "Crack Tip Fields Under Non-Steady Creep Conditions-I. Estimates of the Amplitude of the Fields," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 263~276.
- (13) Ainsworth, R. A., Budden, P. J., 1990, "Crack tip Fields Under Non-Steady Creep Conditions - II. Estimates of Associated Crack Growth," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, pp. 277~285.
- (14) Kim, Y. J., 2001, "Contour Integral Calculations for Generalized Creep Laws Within ABAQUS," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 661~666
- (15) Kim, Y. J., Dean, D. W. and Budden, P. J., 2001, "Finite Element Analysis to Assess the Effect of Initial Plasticity on Transient Creep for Defects Under Mechanical Loading," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 1021~1029.
- (16) Joch, J., Ainsworth, R. A., 1992, "The Development of Creep Singular Fields for Defects in Thermally Loaded Structures," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 15, No. 7, pp. 685~693.
- (17) Lei, Y., 2008, "Finite Element RCC-MR Creep Analysis of Circumferentially Cracked Cylinders Under Combined Residual Stress and Mechanical load," *British Energy Report E/REP/BDBB/0027/GEN/07*, British Energy Generation Limited.
- (18) Song, T. K., Kim, Y. J., 2009, "Estimation of C(t)-Integral in Transient Creep Condition for Pipe with Crack Under Combined Mechanical and Thermal Stress (Part II : Elastic-plastic-creep)," *Submitted to Transactions of the KSME(A)*
- (19) Song, T. K., Kim, Y. J., Kim, J. S., Jin, T. E., 2007, "Limit Load and Approximate J-Integral Estimates for Axial-Through Wall Cracked Pipe Bend," *Trans. of*

*KSME(A)*, Vol. 31, No. 5, pp.562~569.

- (20) Song, T. K., Oh, C. K., Kim, Y. J., Kim, J. S., Jin, T. E., 2007, "Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analyses for Circumferential Part-Through Surface Cracks at the Interface Between Elbows and Pipes," *Trans. of*

*KSME(A)*, Vol. 31, No. 6, pp.710~717.

- (21) Song, T. K., Oh, C. K., Kim, Y. J., 2008, "V-Factor Estimation Under Thermal and Mechanical Stress for Circumferentially Cracked Cylinder," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 32, No. 12, pp. 1123~1131.