

열응력 및 기계응력이 작용하는 균열배관의 하중조건에 따른 천이 크리프 조건 $C(t)$ -적분 평가

오창영* · 송태광** · 김윤재*†

* 고려대학교 기계공학과, ** 한국원자력안전기술원

Estimation of $C(t)$ -Integral Under Transient Creep Conditions for a Cracked Pipe Subjected to Combined Mechanical and Thermal Loads Depending on Loading Conditions

Chang-Young Oh*, Tae-Kwang Song* and Yun-Jae Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

** Korea Institute of Nuclear Safety

(Received August 20, 2010 ; Revised February 22, 2011 ; Accepted March 3, 2011)

Key Words : $C(t)$ -Integral($C(t)$ -적분), Crack(균열), Transient Creep Condition(천이 크리프 조건), Combined Mechanical and Thermal Load(기계하중 및 열하중의 복합하중), Elastic Creep(탄성 크리프), Elastic-Plastic Creep(탄소성 크리프), Stress Ratio(하중비)

초록: 최근 효율을 높이기 위한 플랜트의 환경이 고온, 고압으로 변화함에 따라 열하중과 기계하중을 동시에 반영한 균열 평가는 플랜트의 건전성을 위하여 반드시 필요하다. $C(t)$ -적분은 고온 균열 평가에 있어서 천이 크리프 상태의 균열을 평가하는 중요한 요소이다. 열하중과 기계하중이 동시에 작용하는 환경에서의 $C(t)$ -적분을 예측하는 것은 복잡하며 하중조건이 달라지는 경우에는 더욱더 복잡해진다. 본 논문에서는 열하중과 기계하중의 하중조건이 달라지는 여러 조건에 대한 $C(t)$ -적분 평가식을 제시하였다.

Abstract: There is a trend towards the progressive use of higher operating temperatures and stresses to achieve improved efficiencies in power-generation equipment. It is important to perform the crack assessment under high-temperature and high-pressure conditions. The $C(t)$ -integral is a key parameter in crack assessment for transient creep states. The estimation of the $C(t)$ -integral is complex when considering the mechanical and thermal loads simultaneously. In this paper, we study estimation of $C(t)$ -integral under combined mechanical and thermal load depending on loading conditions

- 기호설명 -

$C(t)$: 천이영역에서의 크리프 매개변수
 C^* : 광범위 크리프 영역에서의 매개변수
 J -integral : J -적분
 J_e : J -적분 탄성성분
 J_p : J -적분 소성성분
 K : 응력확대계수
 K_I^P, K_I^S, K_I^{P+S} : 기계하중, 열하중, 기계하중 및 열하중의 복합하중에서의 응력확대계수
 V : V -factor

L_r : 소성붕괴에 대한 근접성
 σ_{ref} : 참조하중
 σ_y : 항복강도
 t : 크리프 시간
 t_{red} : 재분배시간
 τ : 무차원화시간
 m, A : 소성응력지수 및 재료상수
 n, B : 크리프 응력지수 및 재료상수
 β : 열응력크기에 대한 변수
 E : 탄성계수
 $\dot{\epsilon}, \epsilon$: 크리프 변형률, 크리프 변형률 속도
 ϵ^{el} : 탄성 변형률
 ϵ^{pl} : 소성 변형률

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

r	: 배관의 평균반경
w	: 배관의 두께
θ	: 균열의 원주 크기의 반각
a	: 균열의 두께
ψ	: 원주방향 및 축방향 응력비

1. 서론

균열 구조물에서의 $C(t)$ -적분 및 C^* -적분은 크리프 조건에서의 균열 부근의 응력장(stress field) 및 변형률속도장(strain rate field)의 크기를 나타내며, 고온 균열 구조물의 평가에서 중요한 매개변수가 된다.^(1,2)

일반적으로 크리프 물성은 실제 현상에서는 복잡하게 나타나지만, 멱급수 크리프(Power Law Creep) 법칙을 이용하여 간단하게 나타내고 이용한다. 이를 이용한 C^* -적분은 여러 연구의 결과로 쉽게 도출할 수 있는 방법들이 고안되었으며, 지금까지 많은 선행 연구가 수행되었다.⁽²⁻⁴⁾

그러나 크리프 천이영역에서 $C(t)$ -적분은 균열 성장을 평가하는 중요한 기준이기 때문에 정확한 평가가 필요하다. 지금까지 여러 평가식들이 제안되었으나, 대부분이 기계하중에 대한 크리프 특성에 제한되었다.⁽¹²⁻¹⁷⁾

최근 효율성을 높이기 위해 플랜트의 환경이 고온, 고압의 환경으로 변화함에 따라 플랜트의 건전성 평가를 위해서는 기계하중과 열하중을 동시에 반영한 평가는 반드시 필요하다.

기존의 복합응력이 작용할 때의 크리프 평가 방법을 살펴보면 Joch, Ainsworth, Lei 등이 기계하중이 작용할 때, 2 차하중에 대한 평가에 대한 시도가 있었으나 정량적인 평가로는 한계가 있다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾

최근 Song 등은 복합하중을 받고 있는 탄성 크리프 재료에 대한 균열 배관의 여러가지 경우에 대하여 $C(t)$ -적분을 평가하여 2 차하중에 대한 영향을 정량화하여 평가할 수 있는 방법을 제시하였지만, 기계하중이 축방향인 경우만을 고려하였다.^(21,22) 일반적인 플랜트의 배관에서는 기계하중으로 내압을 가지게 되며 열하중을 동시에 받는다. 또한 가동상태나 주변환경에 따라 배관에 작용하는 응력상태가 달라지게 된다.

본 연구에서는 실제 플랜트의 배관 응력분포가 달라지는 것을 고려해 축방향과 원주방향의 응력비를 가정한 균열 배관에 적용하여 Song 등이 제시한 식의 실질적인 배관의 $C(t)$ -적분 평가식 적용성을 살펴보고 개선하였다. 기존 연구에서 제시한 식을 이용하여 균열배관에 응력이 임의의 비를 이

루며 작용할 때, 고온 균열 구조물의 $C(t)$ -적분을 평가하는 식을 제시하였으며, 2 차 하중에 대한 영향을 정량화 하였다.

2. 유한요소 해석

본 연구에서의 해석 대상은 Fig. 1 에 제시된 형태로 360° 원주방향 전체에 표면균열이 발생한 경우의 배관과 45° 크기의 부분적인 표면균열 상태의 배관에 대한 균열을 고려하였다.

배관에 적용한 물성은 탄성계수가 200 GPa 이며 포와송 비는 $\nu=0.3$ 인 재료를 사용하였다. 소성의 경우 항복강도는 300 MPa 이며, 식 (1)에 제시되는 Ramberg-Osgood 식을 만족하는 A 와 α 를 적용하였다. A 와 α 는 식 (2)와 (3)와 같다. 재료의 소성경화 지수는 m 이 5 와 10 인 경우를 가정하고 적용하였다.

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^m = \frac{\sigma}{E} + A\sigma^m \quad (1)$$

$$A = \frac{\alpha}{E\sigma_y^{m-1}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{0.002E}{\sigma_o} \left(= \frac{4}{3} \right) \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = B\sigma^n \quad (4)$$

재료의 크리프 물성의 경우 식 (4)를 만족하는 멱급수(Power Law) 법칙을 적용하였다. 탄성-크리프 재료의 경우 재료상수 n 에 대하여 n 이 5 와 10 인 경우를 고려하였으며, 탄소성-크리프 재료의 경우는 m 과 n 이 같다고 가정하여 m 과 n 이 5 와 10 에 대하여 $B=1.0 \times 10^{-15}$, 3.4×10^{-28} 을 적용하였다. 재료 소성경화 지수와 크리프 물성을 위와 같이 정한 이유는 일반적으로 사용하는 금속의 크리프 물성인 n 이 5 에서 10 사이의 값을 나타내기 때문이다.

본 연구에서는 배관에 작용하는 기계하중의 경우, 배관의 축방향과 원주방향의 응력비를 변수 ψ 를 도입하여 정의하였다.

$$\psi = \frac{\sigma_{hoop}}{2\sigma_{axial}} \quad (0 \leq \psi \leq 1) \quad (5)$$

본 연구에서 적용한 기계하중의 축방향과 원주방향 응력비는 Table 1 에 설명되며, 배관에 작용하는 내압과 축방향 하중의 크기는 기존 연구에서 검증된 배관에 표면균열이 존재할 때의 한계하중식을 참고하여 사용하였다. 참고한 한계하중식은

Table 1 Primary loading condition for pipe

ψ	loading ratio ($\sigma_{axial} : \sigma_{hoop}$)
0	1:0
0.5	1:1
1	1:2

Table 2 Correction factor for optimized reference stress

θ/π	ψ	$m=n=5$	$m=n=10$
0.125	0	0.79	0.90
	0.5	0.5	0.5
	1.0	0.66	0.3
1.0	0	1.03	1.14
	0.5	0.63	0.63
	1.0	0.86	0.83

$$P_L = (2\pi r t \sigma_y) \cdot \left(1 - \frac{\theta \frac{a}{t} + 2 \sin^{-1} \left(\frac{a \sin(\theta)}{t} \right)}{\pi} \right) (\psi = 0) \quad (6)$$

$$p_L = \frac{P_L r}{2\sigma_o w} = \min \left[1 - \frac{a \theta}{w \pi} - \frac{2 \sin^{-1} \left(\frac{a \sin(\theta)}{w} \right)}{\pi}, \frac{1}{2} \right] (\psi = 0.5, 1.0) \quad (7)$$

ψ 가 0 인 경우는 식 (6)를 적용하였으며, 내압이 작용하는 ψ 가 0.5 인 경우는 식 (7)을 적용하여 내압에 의한 등가의 배관 끝단 효과를 적용하여 응력비를 적용하고, ψ 가 1.0 인 경우 배관 끝단 효과를 2 배 적용하여 응력비를 조정하였다.^(26, 27)

기계하중의 크기를 정량화하기 위해서 R6 에서 사용하는 참조응력법(reference stress method)을 식 (8)과 같이 이용하여 정의하였다.⁽²⁸⁾

$$L_r = \frac{P}{\gamma P_L} = \frac{P}{P_{OR}} = \frac{P}{P_{ref}} \quad (8)$$

참조응력법을 통해 하중의 크기를 정의하는 경우 정확한 참조하중의 결과를 정의하기 위해 보정 계수(γ)를 적용한다. 본 연구에서 적용한 각 균열 크기에 대한 보정계수는 Table 2 에서 확인할 수 있다.

복합하중에 대한 J -적분은 식 (9)에 나타나며 이는 재분배 시간 정의에 사용된다. 식 (9)를 포함한 본 논문의 수식에서 위첨자 "S"는 열하중에서 값을 의미하며, "P"는 기계하중, "P+S"는 기계하중 및 열하중이 동시에 작용하는 복합하중에서의 값을 의미한다.

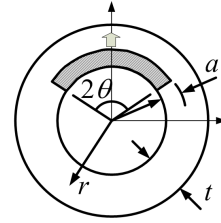


Fig. 1 Schematic illustration for pipe with part-through surface crack

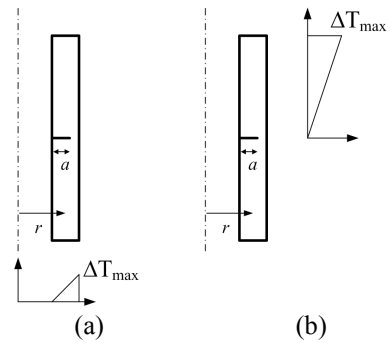


Fig. 2 Type of thermal loading: (a) radial temperature gradient (b) Axial temperature gradient

$$J^{P+S} = \frac{(K^P + V \cdot K^S)^2}{E'} \left(\frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{2 E \varepsilon_{ref}} \right) = \frac{(K^P + V \cdot K^S)^2}{E'} f^{-2}(L_r) \quad (9)$$

식 (9)에 제시된 V 는 R6 에서 제시하는 V -factor 로써 열하중과 기계하중의 관계를 나타내는 하나의 식이다.

식 (10)에서 V -factor 의 정량화된 식을 나타낸다. 복합응력이 작용할 때, 소성에 의한 응력재분배가 나타나는 현상을 정량화 한 것이다.

$$V = \sqrt{\frac{J_e^P}{J_e^S}} \left(\sqrt{\frac{J^{P+S}}{J^P}} - 1 \right) = \frac{K_I^P}{K_I^S} \left(\frac{K_J^{P+S}}{K_J^P} - 1 \right) \quad (10)$$

배관에 적용하는 열하중의 크기는 균열을 열어주는 온도의 분포와 크기를 고려하였으며, R6 에 제시되어 있는 β 를 도입하여 사용하였으며 식 (11) 의와 같다. 배관의 균열을 열어주는 열하중은 배관의 국부적인 온도차이 혹은 광범위한 온도차이로 인한 균열을 열어주는 경우에 대하여 고려하였다. 고려된 온도분포 형태는 Fig. 2 에 개략적으로 나타내었다. 열하중의 크기는 보정된 기계하중의 크기의 비율로 적용된 값을 사용하였다. 배관에 부여하는 열하중의 크기는 β 가 0.5, 1.0, 2.0, 5.0인 경우에 대하여 고려하였다.

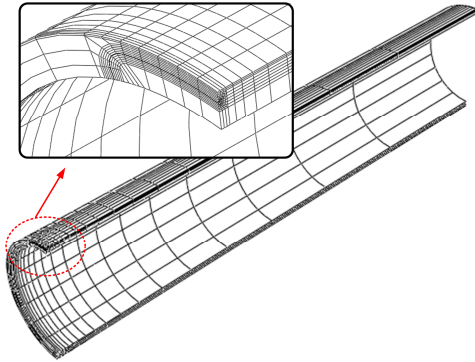


Fig. 3 FE-mesh for pipe with part-through surface crack

$$\beta = \frac{K_I^S}{K_I^P / Lr} \quad (11)$$

본 연구에서는 범용프로그램인 ABAQUS 를 사용하여 해석하였다. 해석에서 사용한 유한요소망의 종류는 2 차원 축대칭 모델의 경우, CAX8R 을 사용하였으며, 3 차원 해석의 경우 C3D20R 을 사용하였다. 2 차원 유한요소해석의 경우 915 개가 사용되었으며, 3 차원의 경우 10200 개가 사용되었다. $C(t)$ -적분 유한요소 해석에 영향을 많이 미치는 요소의 크기는 민감도 해석을 통해 최소요소 크기를 찾아서 적용하였다.

3. 기존 $C(t)$ -적분 평가

기계하중에 대한 $C(t)$ -적분에 대하여 Kim 등은 유한 요소 해석을 통해 다양한 균열형상에 대하여 Ainsworth 와 Budden 의 식을 고려하여 다음과 같은 결과를 제시하였다.⁽¹⁷⁾ 기계하중만이 작용할 때, 재료상수인 n 에 민감하지 않다는 것을 확인, 탄성-크리프 재료에 대하여 $C(t)$ -적분에 대한 예측식을 다음과 같이 제시하였다.^(14,15)

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{(1+\tau)^{4.5}}{(1+\tau)^{4.5} - 1} \quad (12)$$

제시된 τ 는 무차원화된 시간으로써 식 (13)과 같이 정의되며, t_{red} 은 응력재분배 시간으로 식 (14)와 같이 정의된다. 기존 연구들에서 탄-소성 크리프 물성의 배관에 대해서 $C(t)$ -적분 혹은 C^* -적분 고려할 때는 균열 부근의 응력장, J -적분을 이용하여 응력재분배 시간을 고려한다.

$$\tau = \frac{t}{t_{red}} \quad (13)$$

$$t_{red} = \frac{K^2}{E'C^*} = \frac{J_o}{C^*} \quad (14)$$

또한 Kim 등은 탄-소성-크리프 재료에 대해서도 여러가지 형상에 대하여 $C(t)$ -적분 평가식을 다음과 같이 제시하였다.⁽¹⁵⁾

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{(1+\tau)^{4.5}}{(1+\tau)^{4.5} - \phi} \quad (15)$$

ϕ 는 Joch 와 Ainthworth 가 탄-소성-크리프 재료에 도입한 변수로서 초기하중에 의한 소성이 $C(t)$ -적분에 미치는 영향을 정량화 하였다.⁽¹⁸⁾ 식 (16)의 A 와 B 는 2 장에서 설명된 재료 상수이다.

$$\phi = 1 - \frac{AC^*}{BJ_o} \quad (16)$$

최근 Song 등은 최근 배관의 원주방향 표면균열에서 기계하중이 축방향 하중으로 작용할 때 열하중을 정량적으로 고려하여 $C(t)$ -적분을 평가하는 식을 제시하였다. 균열 배관에 기계하중은 축방향 하중이 작용하고, 열응력의 분포가 균열을 여는 크기와 분포로 작용할 때, $C(t)$ -적분 평가를 다음과 같이 제시하였다.^(21,22)

탄성-크리프 재료 물성의 경우, 균열 배관에 복합하중이 작용할 때, 제시한 $C(t)$ -적분 평가식은 다음과 같다.

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

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

탄소성-크리프 재료 물성의 경우, 복합하중이 작용할 경우에는 $C(t)$ -적분 평가를 (19), (20)와 같이 제시하였다.

$$t_{red}^{p+s} = \begin{cases} \frac{J_o}{C^*} = \frac{(K^P)^2}{E'C^*} \left[1 + V \frac{\beta}{Lr}\right]^2 f^{-2}(L_r) & \text{for } \left(1 + V \frac{\beta}{Lr}\right)^2 f^{-2}(L_r) < 10 \\ 10 \frac{J_o}{C^*} = 10 \frac{(K^P)^2}{E'C^*} f^{-2}(L_r) & \text{for } \left(1 + V \frac{\beta}{Lr}\right)^2 \geq 10 \end{cases} \quad (19)$$

$$\frac{C(t)}{C^*} = \frac{(1+\tau^{p+s})^{4.5}}{(1+\tau^{p+s})^{4.5} - \phi} \quad \text{with } \tau^{p+s} = \frac{t}{t_{red}^{p+s}} \quad (20)$$

Lei 가 제시한 Z-계수를 이용한 $C(t)$ -적분 평가식은 시간과 응력과의 미분 방정식의 관계를 수치적분을 이용하여 구해야 하고, 수치해석과 유한요

소해석을 이용하여 시행착오를 통한 최적화된 값을 구하는 과정을 가진다.^(19,20) 하지만 Song 등이 제시한 위의 식 (17) ~ (20)은 열하중의 크기에 대하여 응력재분배 시간을 재정의함으로써 열하중과 기계하중이 작용할 때의 $C(t)$ -적분 평가를 쉽게할 수 있다는 장점을 가진다. 하지만 Song 등이 제시한 예측식은 축방향 응력의 영향만을 고려하였기 때문에 실제 일반적인 배관에서의 달라지는 하중 조건에 대한 평가 식이 필요하다. 본 논문에서는 일반적으로 실제 배관에서 내압이 작용할 때를 고려하여 기존의 평가식의 적용가능성을 정량적으로 접근하였다.

4. 응력비에 따른 $C(t)$ -적분 평가

4.1 기계하중에 대한 $C(t)$ -적분 평가

본 연구에서는 균열배관에서 응력비가 달라질 때 Kim 등이 제시한 $C(t)$ -적분 평가식이 적용되는지 검증하였다. Fig. 4는 탄성-크리프 n 이 5인 재료일 경우, 배관에 작용하는 응력비가 달라질 때, 기존 평가식과 비교하였다. 기존 평가식에 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향은 n 이 10인 경우를 포함해 m 과 n 이 5, 10의 경우에서도 다르지 않으며, 기존 평가식과 잘 일치함을 확인하였다.

4.2 기존식을 고려한 응력비에 따른 $C(t)$ -적분 경향

Fig. 5는 복합응력이 작용 시, 기존 기계하중에서의 $C(t)$ -적분 평가식으로 응력재분배를 고려할 때, 응력비에 따라 $C(t)$ -적분 결과가 어떻게 달라지는지를 나타낸다.

먼저 복합하중의 변수 L_r 및 β 에 따라 다양한 형태의 $C(t)$ -적분 결과가 나타나며, 식 (12)와는 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. β 에 따른 $C(t)$ -적분 결과는 2 차하중의 크기가 큰 $\beta=5.0$ 에서 낮은 τ 에서 수렴을 하는 것으로 나타나며, 2차하중의 크기가 클수록 응력이 재분배 되는 시간이 길어지는 것으로 판단되며, 배관에 임의의 응력비를 이루며 작용하는 경우에 $C(t)$ -적분을 기존 식 (12)만으로 평가하는 것은 한계가 있다고 판단된다.

복합하중이 작용할 때, 응력비에 따른 $C(t)$ -적분의 평가를 위하여, 기계하중에 의한 J_0^p 를 기준으로 응력 재분배 시간을 적용해 $C(t)$ -적분을 나타낸 결과를 Fig. 6에서 확인할 수 있다. Fig. 6에서는 $C(t)$ -적분이 응력비에 따라 응력재분배 시간이 일정한 비를 $C(t)$ -적분이 거동한다는 특징적인 현상이 나타난다.

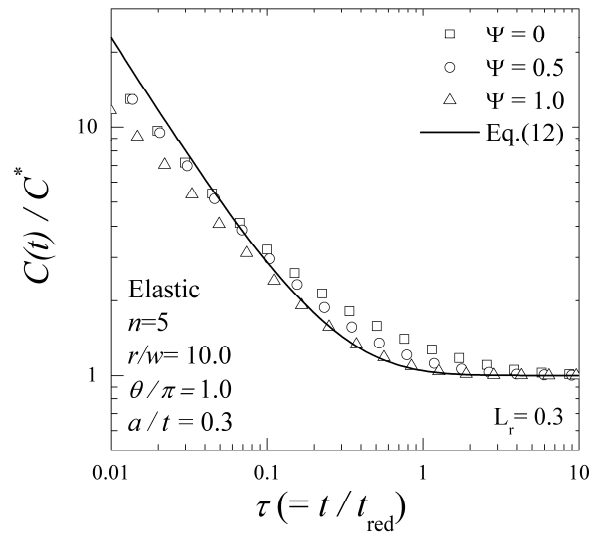


Fig. 4 Comparison of finite element results with proposed solutions for $C(t)$ -integral under mechanical stress alone

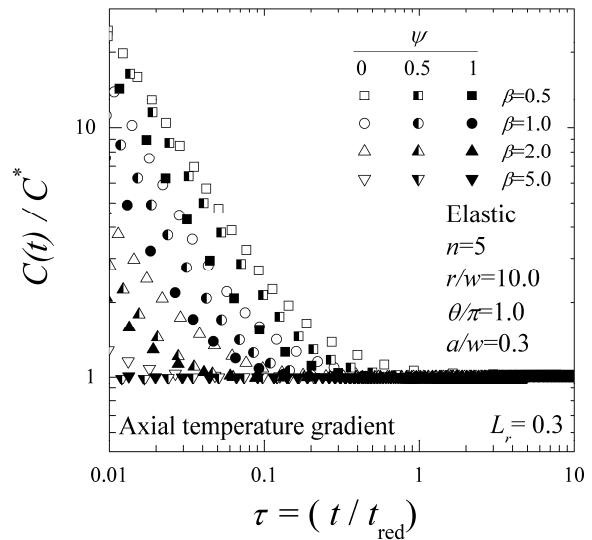


Fig. 5 Comparison of finite element results with proposed solutions for $C(t)$ -integral under mechanical and thermal stresses

본 연구에서 고려된 모든 응력비와 2 차하중의 크기에 따라서 재분배 되는 시간 τ 값은 다양한 차이가 있지만, Song 등이 고려했었던 다양한 열하중 조건에서 $C(t)/C^*$ 의 기울기가 일정하여, $t \rightarrow 0$ 에서 점근(asymptote)의 특성이 유지하는 것은 모든 경우에 성립됨을 알 수 있다. 또한 기계하중을 기준으로 응력 재분배를 고려하는 것은 식 (12)의 식에 가까워질 수는 있으나, 정확한 예측을 하기에는 힘들다는 사실을 나타낸다. 응력비에 대한 $C(t)$ -적분의 경향을 살펴보면 1 차하중과 2 차하중에 대해 다양한 형태로 나타나며, 이를 통해 $C(t)$ -적분의 평가를 위해서는 복합적인 관계식으로 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

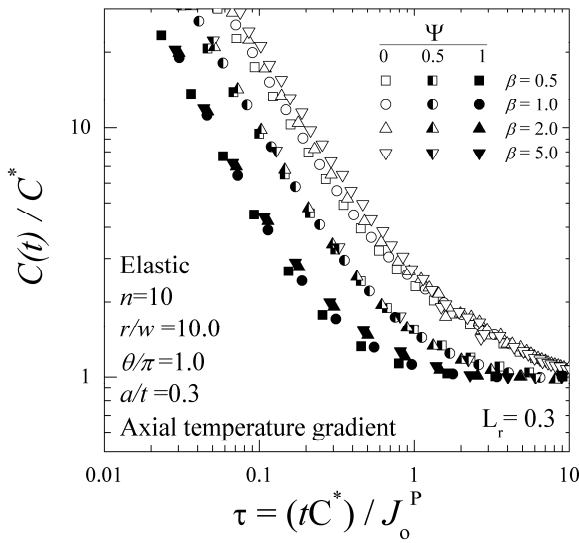


Fig. 6 Finite element results with normalized time J_0^P under mechanical and thermal stresses

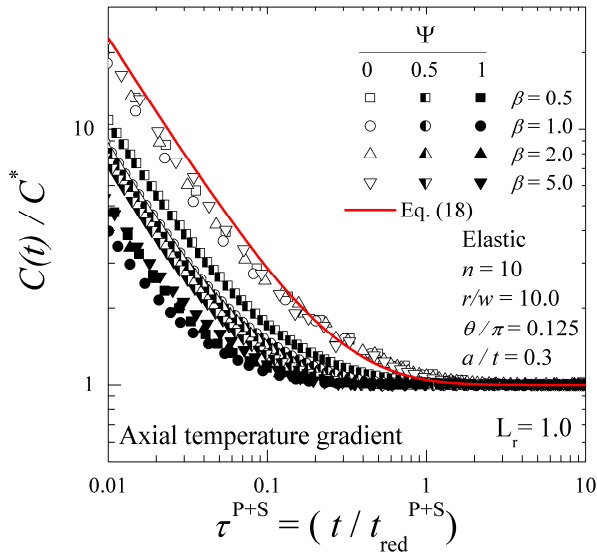


Fig. 7 Comparison of finite element results with proposed solutions for $C(t)$ -integral under mechanical and thermal stresses

본 연구에서는 균열 배관에 응력비에 따라 나타나는 $C(t)$ -적분 평가식을 제시하기 위해서 기존 평가식인 Song 등이 제시한 식 (17) ~ (20)을 적용하여 $C(t)$ -적분 결과를 Fig. 7에 나타내어 보았다.

본 연구에서 고려한 응력비(ψ)에 기존 응력재분배 시간을 고려한 식을 적용하면, 축방향 하중을 제외한 나머지 응력비의 경우에 기존 평가식에 비해서 보수적인 결과 값이 나오는 것을 알 수 있다. 그런 경향은 n 이 5 인의 경우보다 n 이 10 인 경우에서 두드러지게 나타난다.

균열 배관에 응력비를 이루면서 하중이 작용할

Table 3 Redistribution time factor of proportional loading

ψ	$f(\psi)$
0	10
0.5	7.5
1.0	5

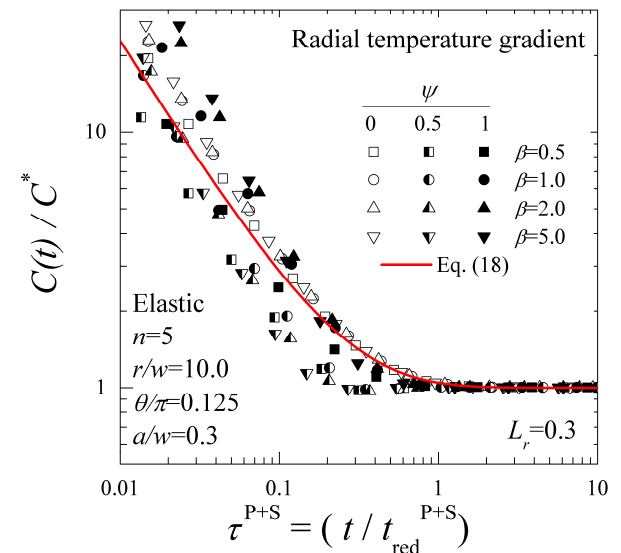
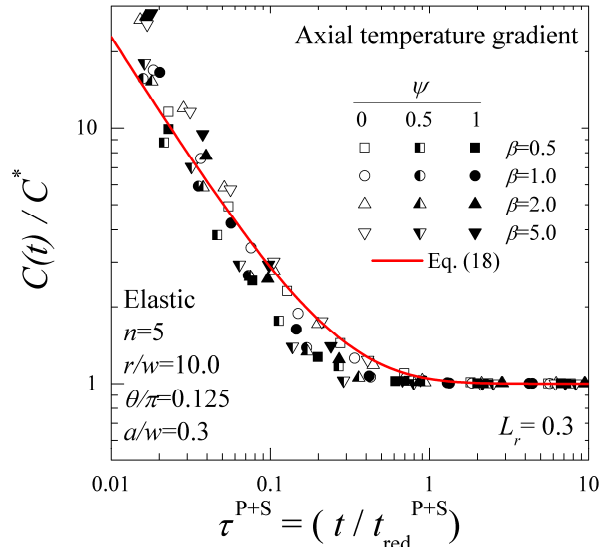


Fig. 8 Finite element results with proposed solutions for elastic-creep $C(t)$ -integral under mechanical and thermal stresses

경우에는 두드러진 보수성을 개선하기 위해 기존 평가식의 응력재분배 시간 τ 의 정의를 다시 정의할 필요가 있음을 도출할 수 있다.

4.3 복합하중 시 응력비에 따른 $C(t)$ -적분 평가

본 연구에서는 기존식을 고려하여 도출한 응력비에 따른 $C(t)$ -적분의 특징적인 사실을 통해 균열

배관이 하중에 의하여 일정한 응력비가 작용할 때에, 응력 재분배 시간 정의를 기존의 응력재분배 시간을 고려하여 다음과 같이 제시하였다.

$$t_{red}^{P+S} = \begin{cases} \frac{J_o}{C^*} = \frac{(K^P)^2}{EC^*} \left[1 + \frac{\beta}{L_r} \right]^2 \text{ for } \left(1 + \frac{\beta}{L_r} \right)^2 < f(\psi) \\ f(\psi) \frac{J_o}{C^*} = f(\psi) \frac{(K^P)^2}{EC^*} \text{ for } \left(1 + \frac{\beta}{L_r} \right)^2 \geq f(\psi) \end{cases} \quad (21)$$

$$t_{red}^{P+S} = \begin{cases} \frac{J_o}{C^*} = \frac{(K^P)^2}{EC^*} \left[1 + V \frac{\beta}{L_r} \right]^2 f^{-2}(L_r) \text{ for } \left(1 + V \frac{\beta}{L_r} \right)^2 f^{-2}(L_r) < f(\psi) \\ f(\psi) \frac{J_o}{C^*} = f(\psi) \frac{(K^P)^2}{EC^*} f^{-2}(L_r) \text{ for } \left(1 + V \frac{\beta}{L_r} \right)^2 \geq f(\psi) \end{cases} \quad (22)$$

응력 재분배 시간을 탄성-크리프 조건에서는 식 (21)로 재정의 하고, 탄-소성-크리프 조건에서는 식 (22)으로 재정의 한다. 기존식의 기준인 축방향에 대한 재분배 시간에 대한 정의를 하기에는 보수적인 $C(t)$ -적분값을 평가하기 때문에 $f(\psi)$ 값의 변화가 필요하다. 하중비가 달라지면서 달라지는 응력분포에 대한 응력재분배 시간의 조정을 식 (21)과 (22)로 수정하여 제시하였다.

Fig. 8 은 본 연구에서 고려한 응력비와 열하중을 제안한 응력 재분배 시간을 적용해 탄성-크리프 조건에서 $C(t)$ -적분 평가 결과를 나타낸 그림이다. 전반적으로 평가식이 유한 요소 해석 결과와 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 9 는 탄-소성-크리프 조건에서 본 연구에서 제시한 응력 재분배 시간을 적용해 $C(t)$ -적분을 나타내었다. $L_r=1.0$ 에서는 보수적인 결과를 나타낸다.

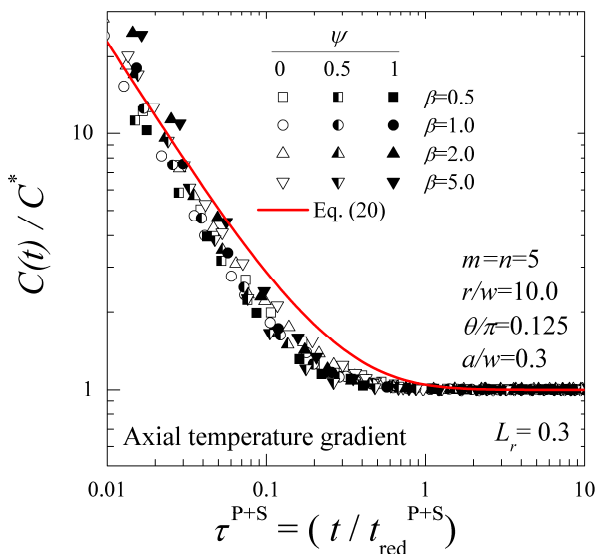


Fig. 9 Finite element results with proposed solutions for elastic-creep $C(t)$ -integral under mechanical and thermal stresses

그러나 이 경우에서도 응력재분배 시간에 대한 재정의로 기존 평가식의 보수성을 개선하였다.

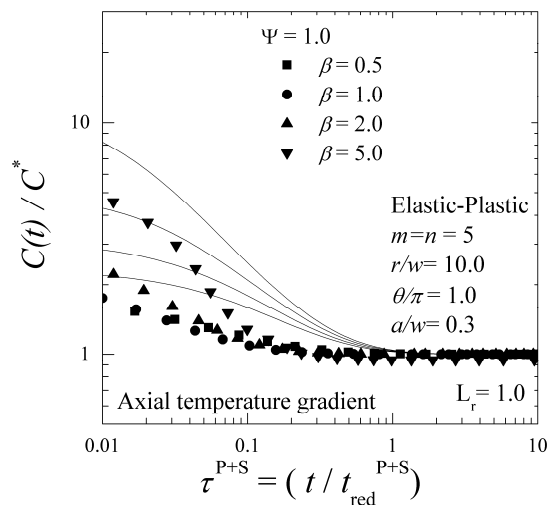
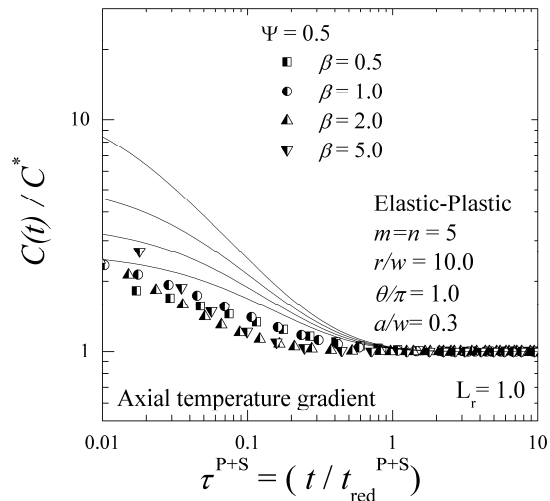
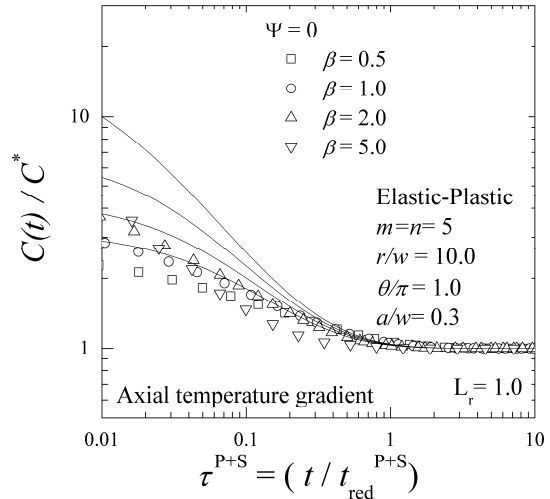


Fig. 10 Finite element results with proposed solutions for elastic-plastic creep $C(t)$ -integral under mechanical and thermal stresses

Table 4 Plasticity effect values of ϕ for $n=m$ case

L_r	Load type	ψ	β	$\phi(n=m=5)$	$\phi(n=m=10)$	
1.0	Mechanical Only	0		0.558	0.747	
		0.5	-	0.439	0.514	
		1.0		0.404	0.434	
	Combined Load (Axial temperature)	0		0.5	0.735	0.873
				1.0	0.815	0.920
				2.0	0.890	0.953
				5.0	0.958	0.980
		0.5		0.5	0.623	0.699
				1.0	0.719	0.780
				2.0	0.817	0.854
	1.0			5.0	0.922	0.934
				0.5	0.569	0.636
				1.0	0.678	0.738
				2.0	0.802	0.840
		5.0	0.924	0.938		

탄-소성 크리프 해석에서의 특징적인 형태는 재료의 초기하중에 영향을 받는 소성을 정량화한 변수 ϕ 의 크기가 전체적으로 $\psi=0$ 에서 가장 크게 나타나고 $\psi=1$ 에서 가장 낮게 나타나는 경향이 나타난다. 이런 특징적인 형태는 $L_r=1.0$ 에서 잘 나타나며 Fig. 10에 나타내었다. 이는 내압으로 인한 균열 끝단 주위의 소성변형이 축방향 응력만 작용하는 경우보다 영향이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 위의 특징을 나타내는 해석값을 바탕으로 적용한 $L_r=1.0$ 일 때의 ϕ 값은 Table 4에 나타내었다.

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 복합하중이 배관에 축방향과 원주방향 응력이 응력비를 이루며 작용할 때, 탄성-크리프, 탄-소성-크리프 재료에 대하여 $C(t)$ -적분을 평가하는 식을 제시하였다.

(1) 응력비에 따라 $C(t)$ -적분은 일정한 비율을 가지는 특징이 있으며, 그 특징으로 Song 등이 제시한 응력 재분배 시간을 기반으로 재정의하는 식을 제안하였다.

(2) 재료의 일반적인 소성경화지수와 크리프 물성을 전반적으로 포함하는 m 과 n 이 5와 10인 경우에 본 연구에서 제시하는 응력 재분배 시간을 이용해 $C(t)$ -적분 평가를 간단한 기존식에 대하여 적용 가능하다.

(3) 균열 배관에 응력비를 이루며 하중이 작용할 때, 본 연구에서 제안한 식은 유한요소 해석과 유사한 결과가 나타난다.

본 연구에서는 실제 배관에서는 다양한 응력비

의 형태로 하중이 작용할 것으로 판단될 것을 가정하여 축방향 하중뿐만 아니라 내압까지 고려하였다. 제안한 식을 바탕으로 실제 균열 배관의 $C(t)$ -적분을 평가하는데 적용가능 할 것으로 판단된다. 또한 고온 구조물의 균열에서의 크리프 현상을 예측하고 평가하는 자료로도 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100100780)

참고문헌

- (1) Webster, G. A. and 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) Webster, G. A. "Methods of Estimating C^* , Mater High Temp," 1992; 10: 74~78.
- (4) Riedel H., 1987 Fracture at High Temperatures. Springer-Verlag, Berlin
- (5) 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.
- (6) Kumar, V., Gennan, M. D. and Shih C. F., 1981, "An Engineering Approach for Clastic Plastic Fracture

- Analysis," EPRI report, No. 1931.
- (7) British Energy Generation Ltd., 2007, R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Effects," *Revision of*
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Nikbin, K. M., Webster, O. A. and Turner, C. E., 1976, "Relevance of Nonlinear Fracture Mechanics to Creep Cracking, Cracks and Fractured," ASTM STP 601, pp. 47~62.
- (11) Harper, M. P. and 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.
- (12) Riedel, H. and Rice, J. R., 1980, "Tensile Cracks in Creeping Solids," *Fracture Mechanics : Twelfth Conference*, ASTM STP 700, pp. 112~130.
- (13) Ehlers, R. and 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.
- (14) Ainsworth, R. A. and 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.
- (15) Ainsworth, R. A. and 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.
- (16) 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
- (17) 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.
- (18) Joch, J. and 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.
- (19) Lei, Y., 2008, "Finite Element RCC-MR Creep Analysis of Circumferentially Cracked Cylinders Under Combined Residual Stress and Mechanical Load," *British Energy Report EIREPIBDBB100171GENI07*, British Energy Generation Limited.
- (20) Lei Y., 2005 A Validation of the Newly Extended Method for the Estimation of the Creep Crack Tip Characterising Parameters Using Existing Finite Element Results. British Energy Report E/REP/BDBB/0083/GEN/05, British Energy Generation Limited.
- (21) Song, T. K. and Kim, Y. J., 2009, "Estimation of C(t) Integral in Transient Creep Condition for Pipe with Crack Under Combined Mechanical and Thermal Stress (Part I - Elastic creep)," *Trans. of KSME(A)*, Vol.33, No.9, pp. 949~956
- (22) Song, T. K. and 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)," *Trans. of KSME(A)*, Vol.33, No.10, pp. 1065~1073
- (23) Song, T. K., Kim, Y. J., Kim, J. S. and 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.
- (24) Song, T. K., Oh, C. K., Kim, Y. J., Kim, J. S. and Lin, 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.
- (25) Song, T. K., Oh, C. K. and 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.
- (26) Kim, Y. J., Shim, D. J., Huh, N.S. and Kim, Y. J., 2002, "Plastic Limit Pressures for Cracked Pipes Using Finite Element Limit Analyses," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol.79, pp. 321~330
- (27) Kim, Y. J., Shim, D. J., Nikbin, K. and Kim, Y. J., 2003, "Finite Element Based Plastic Limit Loads for Cylinders with Part-Through Surface Cracks Under Combined Loading," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol.80, pp. 527~540
- (28) R6, Revision 4, 2006," Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," British Energy Generation Ltd, Gloucester, UK.