

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.12.1123

열하중 및 기계하중이 작용하는 원주 방향 균열 배관에 대한 V-계수 평가

송태광* · 오창균** · 김윤재 †

(2008년 9월 11일 접수, 2008년 10월 24일 수정, 2008년 10월 28일 심사완료)

V-Factor Estimation Under Thermal and Mechanical Stress for Circumferentially Cracked Cylinder

Tae-Kwang Song, Chang-Kyun Oh and Yun-Jae Kim

Key Words : V-factor(V-계수), Primary Stress(1 차 하중), Secondary Stress(2 차 하중), Reference Stress Method(참조응력법), J-integral(J 적분)

Abstract

This paper provides V-factor estimation under combined mechanical and thermal load for circumferential cracks. Results are based on finite element analyses and effect of types and magnitudes of the thermal stress, crack geometry, the loading mode and plastic strain hardening on variations of the V-factor are investigated. The results of finite element analyses are compared with R6 values. As a result, it is shown that R6 gives generally conservative results. The conservatism is especially increased for the combination of large mechanical and thermal load. As a result, new estimation method which uses failure assessment line in R6 is proposed for V-factor and gives less conservative results.

기호설명

- K_I^P : 1 차 하중에 대한 응력확대계수
- K_{II}^P : 1 차 하중에 대한 유효응력확대계수
- K_I^{P+S} : 1, 2 차 복합하중에 대한 응력확대계수
- K_{II}^{P+S} : 1, 2 차 복합하중에 대한 유효응력확대계수
- L_r : 구조물에 작용하는 하중 비[식 (2)]
- K_r : 파괴인성 비 [식 (1) or (8)]

1. 서론

일반적인 원전 배관은 인장, 굽힘 등의 기계하중(1 차 하중)과 온도 구배 등에 의한 열 하중(2 차 하중)을 동시에 받고 있다. 기계하중 및 열 하중은 대표적인 하중 제어 및 변위 제어 조건으로서

그 특성이 다르며 또한 기계 및 열하중이 복합적으로 작용할 때에는 상호작용(interaction)에 의한 열응력 완화효과가 나타난다. 따라서 1, 2 차 복합하중이 가해지는 균열 배관에 대한 탄소성 파괴역학 해석을 수행하는 경우 정확한 평가를 위해 열 및 기계하중의 상호 작용을 고려할 필요가 있다.⁽¹⁻³⁾

저온 파괴 평가법인 R6 코드⁽⁴⁾ 및 유럽에서 수행된 SINTAP 프로그램에서는⁽⁵⁾ ρ 및 V-계수를 도입하여 복합하중에서 발생하는 소성(plasticity)에 의한 응력 재분배 및 2 차 응력 완화 효과를 고려하였다.^(6,7) 그러나 최근 이러한 보정 계수를 사용한 해석 결과가 상호작용을 고려하지 않은 결과에 비해 더 보수적일 수 있다는 연구결과가 제시되었다.⁽⁶⁾ 따라서 본 논문에서는 다양한 형상의 균열, 열하중 유형, 기계하중 유형 및 재료 경화 지수에 대해 3 차원 유한요소 해석을 수행하여 V-계수를 구하였으며 코드에서 제시하는 값과 비교하였다. 이를 통해 기존 식의 보수성을 평가하였으며 보수성을 줄인 새로운 V-계수 식을 제안하였다.

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

* 고려대학교 대학원 기계공학부

** 한국전력기술㈜

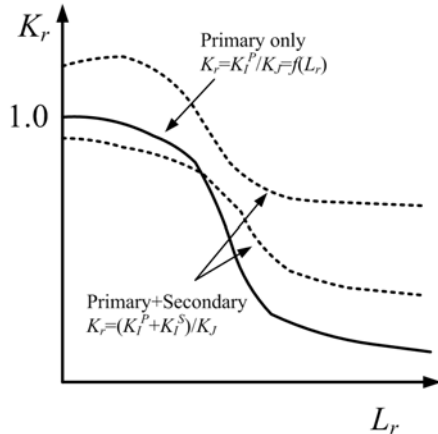


Fig. 1 Schematic plot of failure assessment diagram with and without secondary stress

2 장에서는 R6 코드에서 사용하고 있는 참조응력 기반 V-계수 도출법 및 유한요소 해석을 통한 V-계수 도출식을 간략하게 소개하였으며, 3 장에서는 유한요소 해석에 대한 소개를, 4 장에서는 해석 결과를 언급하였으며 5 장에서 결론을 정리하였다.

2. V 계수 예측

2.1 참조응력법 기반 V-계수 예측

R6 는 참조응력법(Reference Stress Method)을 기반으로 한다. 참조응력법은 두 개의 변수인 L_r (load ratio) 및 K_r (K ratio)를 사용하며 1 차 하중 하에서 각각의 변수는 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$K_r = \frac{K_I^P}{K_J^P} = f(L_r) \quad (1)$$

$$L_r = \frac{N}{N_L} = \frac{M}{M_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (2)$$

여기서 K_I^P 는 1 차 하중이 작용할 때의 응력확대 계수(Stress Intensity Factor)를 나타내며 K_J^P 는 J-적분에 해당하는 유효응력확대계수로서 식 (3)과 같다.

$$K_J^P = \frac{(J^P)^2}{E} \quad (3)$$

식 (3)에서 E '는 탄성계수를 나타내며 평면응력 조건에서는 $E'=E$, 평면변형률 조건에서는 $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다. 또한 J^P 는 1 차 하중 하에서의 J-적분을 나타낸다. 식 (2)에서 N_L 및 M_L 은 인장 및 굽힘 하중을 받는 균열 구조물에 대한 한계 하중(limit load)으로서 참조응력(σ_{ref})를 산출하는 기준이 된다. 참조응력을 통해서 식 (1)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

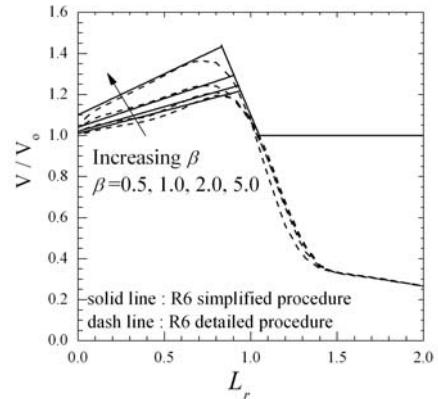


Fig. 2 Variation of V/V_0 with L_r , according to the simplified and detailed procedures given in R6 (assuming $V_0=1$)

$$K_r = \left(\frac{E \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2 \sigma_{ref}}{2 E \varepsilon_{ref}} \right)^{-0.5} = f(L_r) \quad (4)$$

식 (4)에서 ε_{ref} 는 재료의 인장곡선에서 σ_{ref} 에 해당하는 변형률이다. Fig. 1 에서 실선은 1 차 하중만 작용하는 균열 구조물에 대한 일반적인 파손평가도(FAD, Failure Assessment Diagram)를 나타낸다. 그림에서와 같이 하중이 작을 때($L_r \rightarrow 0$) $K_r \cong 1$ 이며 하중이 증가하면서 K_r 이 줄어들음을 알 수 있다.

복합하중하에서의 응력확대계수는 탄성계산에 의해 산출되므로 중첩의 원리가 적용되며 따라서 식 (5)와 같다.

$$K_I^{P+S} = K_I^P + K_I^S \quad (5)$$

여기서 K_I^{P+S} 는 복합하중하에서의 응력확대계수를 나타내며 K_I^S 는 2 차 하중만 작용할 때의 응력확대계수를 나타낸다. 따라서 식 (5)를 사용하면 복합하중이 작용하는 균열 구조물에 대한 K_r 은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{K_I^{P+S}}{K_J^{P+S}} = \frac{(K_I^P + K_I^S)}{K_J^{P+S}} \neq f(L_r) \quad (6)$$

여기서 K_I^{P+S} 는 복합하중하에 대한 유효응력확대계수를 나타낸다. 그러나 Fig. 1 의 점선과 같이 식 (6)은 1 차 하중 하에서 정의된 식 (4)와 일치하지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 복합하중이 작용할 때 상호작용에 의해 응력 재분배가 발생하며 특히 소성에 의해 2 차 응력의 완화 효과가 발생하기 때문이다. 따라서 이를 보정하기 위해 R6 등에서는 V-계수를 도입하였으며 식 (5) 및 (6)은 식 (7) 및 (8)과 같이 재정의 할 수 있다.

$$K_I^{P+S} = K_I^P + V K_I^S \quad (7)$$

$$\frac{K_I^{P+S}}{K_J^{P+S}} = \frac{(K_I^P + VK_I^S)}{K_J^{P+S}} = f(L_r) \quad (8)$$

따라서 V-계수를 알 수 있다면 복합하중이 작용하는 구조물에 대해 유효응력확대계수(K_J^{P+S})를 간편하게 구할 수 있음을 알 수 있다. R6에서는 V-계수를 단순계산법 및 상세계산법으로 제시하고 있으며 2.1.1 및 2.1.2와 같다.

2.1.1 V-계수 단순계산법 (Simplified Procedure)

단순계산법은 2 차하중이 크지 않을 때 사용할 수 있으며 탄성계산을 바탕으로 한다. 이차 하중의 크기는 무차원 변수인 β 를 통해 일차하중에 대한 이차하중의 비를 통해 나타낼 수 있으며 β 의 정의는 식 (9)와 같다.^(6,7)

$$\beta = \frac{K_I^S}{(K_I^P / L_r)} \quad (9)$$

단순계산법에서 제시하는 V-계수는 L_r 및 β 의 함수로서 식 (10)과 같다.

$$V = \begin{cases} 1+0.2L_r+0.02\beta(1+2L_r) & \text{for } L_r < L_r^* \\ 3.1-2L_r & \text{for } L_r^* < L_r < 1.05 \\ 1 & \text{for } L_r > 1.05 \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)에서 L_r^* 는 첫 번째 및 두 번째 식이 만나는 지점으로 정의된다. 식에서와 같이 단순계산법에서의 V-계수는 항상 $V \geq 1$ 이 되며 이는 L_r 이 클 때 이차응력의 소성완화현상이 고려되지 않음을 의미한다. Fig. 2 는 단순계산법 및 상세계산법에서 제시하는 V/V_o 를 나타내며 식 (10)을 확인할 수 있다. 단순계산법에서 V_o 는 1 이며 V_o 에 대한 정의는 2.1.2 에서 확인할 수 있다.

2.1.2 V-계수 상세계산법 (Detailed Procedure)

상세계산법은 탄소성 해석을 바탕으로 한다. 따라서 열하중에 대한 유효응력확대계수(K_J^S)를 필요로 하며 K_I^S 에 대한 K_J^S 의 비를 통해 열하중에 의한 소성영향을 정량화한다. V_o 에 대한 정의는 식 (11)과 같다.^(6,7)

$$V_o = \frac{K_J^S}{K_I^S} \quad (11)$$

상세계산법에서 V-계수는 식 (12)와 같다.

$$V = \zeta V_o \quad (12)$$

여기서 ζ 는 L_r 및 $K_I^S/(K_I^P/L_r)$ 의 함수로서 R6에서는 표를 통해 제시한다. K_J^S 를 구하기 위해서는 탄.소성 계산 또는 K_I^S 에 대한 보정을 통해 구할 수 있지만 균열구조물에 대한 직접적인 탄.소성해석결과가 가장 정확하며⁽⁶⁾ 본 논문에서는 유한요소 해석을 통해 K_J^S 를 구하였다.

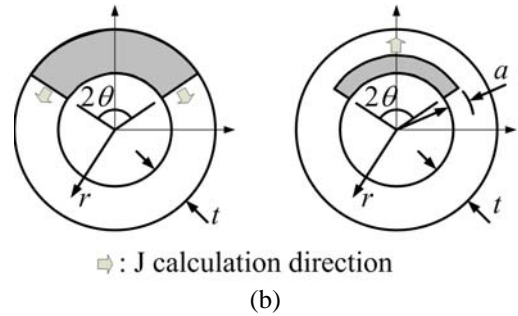


Fig. 3 circumferential through-wall and part-through surface cracks

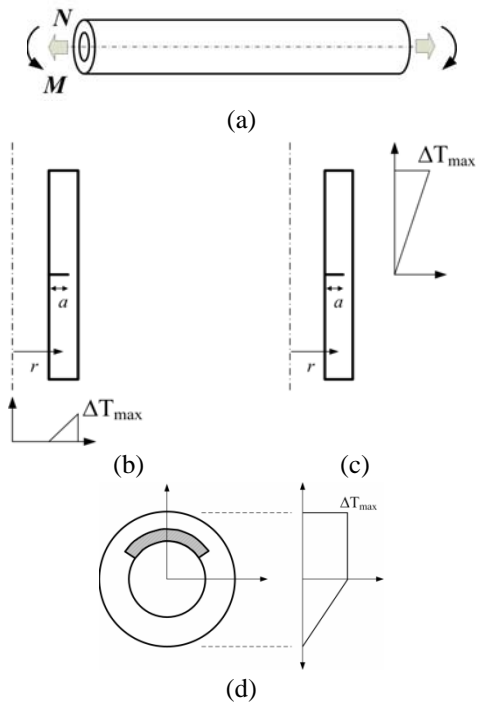


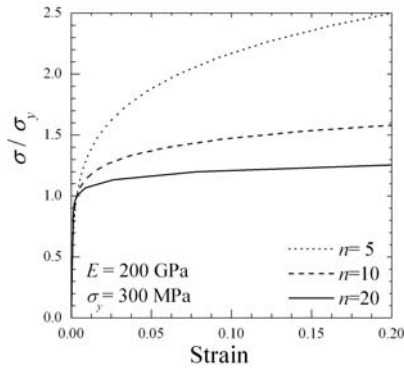
Fig. 4 Pipe under mechanical load((a) and thermal load((b), (c) and (d)). (b) shows radial temperature gradient, (c) axial temperature gradient and (d) sectional temperature gradient

Fig. 2 는 $V_o=1$ 일 때 상세계산법에서 제시하는 V/V_o 를 나타낸다. 그림에서와 같이 $L_r \cong 0$ 에서는 $V=1$ 이며 $L_r < 1$ 에서는 소성 상호작용에 의한 보정을 위해 $V > 1$, $L_r > 1$ 에서는 열응력 완화효과를 고려하기 위해 $V < 1$ 이 됨을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 경향은 열응력이 커질수록 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

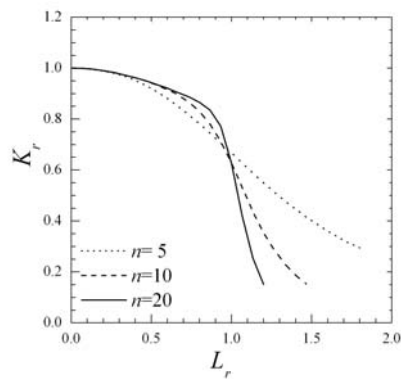
2.2 유한요소 해석을 통한 V-계수 계산

V-계수를 도입한 식 (8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{K_I^{P+S}}{K_J^{P+S}} = \frac{(K_I^P + VK_I^S)}{K_J^{P+S}} = \frac{K_I^P}{K_J^P} \quad (13)$$



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Tensile curve for three different hardening materials and (b) corresponding failure assessment curve

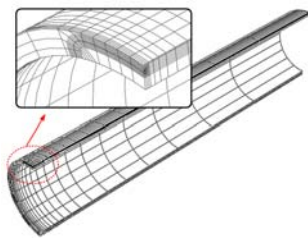


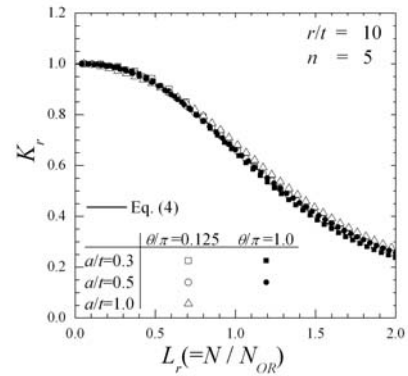
Fig. 6 FE mesh for circumferential part-through surface cracked pipe

따라서 식 (13)을 정리하면 V/V_o 및 V 는 식 (14) 및 (15)와 같다.

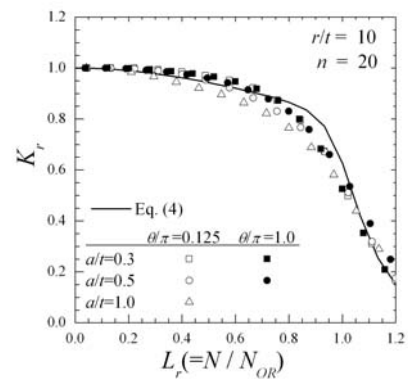
$$\frac{V}{V_o} = \sqrt{\frac{J_e^p}{J^s}} \left(\sqrt{\frac{J^{p+s}}{J^p}} - 1 \right) = \frac{K_I^p}{K_J^s} \left(\frac{K_J^{p+s}}{K_J^p} - 1 \right) \quad (14)$$

$$V = \sqrt{\frac{J_e^p}{J^s}} \left(\sqrt{\frac{J^{p+s}}{J^p}} - 1 \right) = \frac{K_I^p}{K_J^s} \left(\frac{K_J^{p+s}}{K_J^p} - 1 \right) \quad (15)$$

식 (14) 및 (15)를 이용하여 V -계수를 구하는 구체적인 방법은 3.4 절에서 언급하였다.



(a)



(b)

Fig. 7 Failure assessment diagram under primary load only. (a) $n=5$ and (b) $n=20$

3. 유한요소 해석

3.1 형상 변수

본 논문에서는 원주방향 균열 배관에 대한 V -계수를 계산하였다. Fig. 3은 원주방향 관통 및 표면 균열 배관에 대한 단면도를 나타내며 균열 크기로는 $\theta/\pi=0.125\sim 1.0$, $a/t=0.3\sim 1.0$ 을 고려하였다. 반경비(r/t)는 일괄적으로 10을 사용하였다. θ , a , t 및 r 의 정의는 그림에서 확인할 수 있다.

3.2 하중 조건

3.2.1 기계 하중 조건

기계하중은 Fig. 4(a)에서와 같이 축방향 인장 및 굽힘하중을 고려하였다.

3.2.2 열 하중 조건

열 하중은 원주 방향 온도 구배 분포, 축 방향 온도 구배 분포 및 단면에서의 온도 구배 분포를 고려하였다. Fig. 4(b), (c) 및 (d)는 각각의 온도 분포를 도식적으로 보여주고 있으며 온도 분포는 선형 또는 또는 상수분포를 나타낸다.

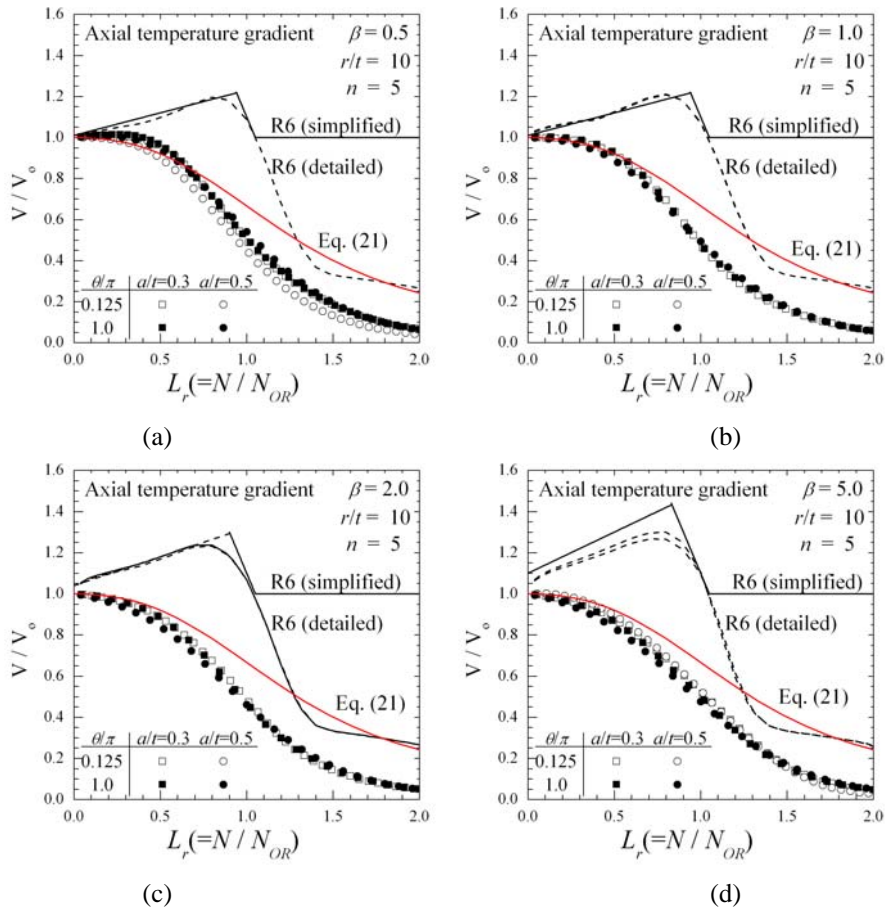


Fig. 8 Variations of V/V_0 with L_r for axial tension with axial temperature gradient : (a) $\beta=0.5$, (b) $\beta=1.0$, (c) $\beta=2.0$ and (d) $\beta=5.0$

그림에서 ΔT_{\max} 는 최대 온도를 나타내며 β 정의에 따라 달라진다. 본 논문에서는 각각의 온도 분포에 대해 네 가지 β 를 고려하였다($\beta=0.5, 1.0, 2.0, 5.0$).

3.3 재료 물성

재료의 인장 곡선은 식 (16)에서와 같이 Ramberg-Osgood 식을 통해 표현하였으며 증분소성이론(incremental plasticity theory)를 사용하였다. 이 때 0.2% 율셋 항복강도(σ_y) 및 탄성계수는 각각 300MPa 및 200GPa 를 사용하였으며 3 가지 소성경화지수(n)를 고려하였다($n=5, 10, 20$). α 는 재료 상수를 나타내며 식 (17)과 같다. 재료의 인장곡선은 Fig. 5(a)에서 확인할 수 있다.

$$\frac{\varepsilon}{(\sigma_y/E)} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{0.002E}{\sigma_y} \left(= \frac{4}{3} \right) \quad (17)$$

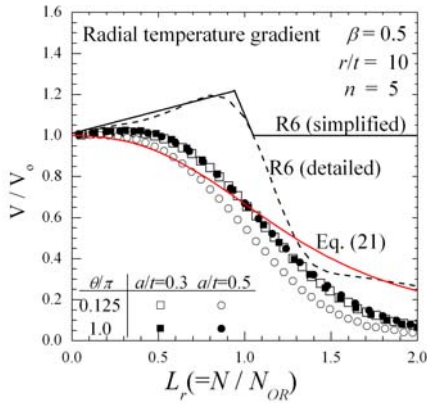
식 (16)으로 정의된 재료 물성에 대한 파손평가 식은 식 (4)를 통해 구할 수 있으며 Fig. 5(b)와 같

다. 그리고 유한요소 해석 시 온도에 따른 재료 물성은 고려하지 않았다.

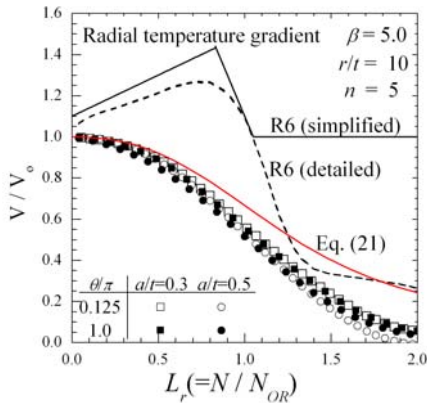
3.4 유한요소 해석

유한요소 해석은 균열 형상에 따라 2 차원 축대칭 요소 또는 3 차원 요소를 사용하였다. 해석은 범용 해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하였으며 균열 끝단에는 썸기 메시(mesh)를 사용하였다. 또한 대칭성을 이용하여 해석 시간 단축을 위해 1/2 또는 1/4 모델을 사용하였다. 표면균열 배관에 대한 유한요소 망은 Fig. 6 에서 확인할 수 있다.

특정 기계하중 및 열하중에 대한 V-계수 계산을 위해서는 3 단계의 유한요소 해석이 필요하다. 본 연구에서는 열하중만 가해지는 경우에 대한 K_I^S 및 K_J^S 에 대한 해석, 기계하중만 가해지는 경우에 대한 K_I^P 및 K_J^P 계산 및 복합하중이 가해지는 경우에 대한 K_I^{P+S} 및 K_J^{P+S} 을 차례대로 수행하였다. 다양한 열 하중에 대해서 식 (5)가 만족하는 것을 확인할 수 있었으며 이를 통해 해석 결과에 대한 간접적인 자체 검증을 만족할 수 있었다.



(a)



(b)

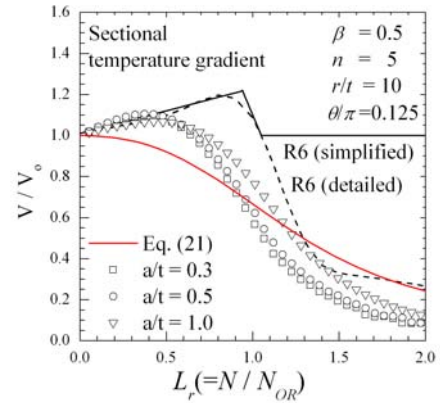
Fig. 9 Variations of V/V_0 with L_r for axial tension under radial temperature gradient : (a) $\beta=0.5$ and (b) $\beta=5.0$

응력확대계수는 작용하중에 의한 영역적분 (domain integral)을 통해 구할 수 있었으며 관통균열에서는 내면 및 외면을 제외한 중앙 5 개 노드에서의 평균값을, 표면균열에서는 최심점(deepest point)에서의 값을 사용하였다. 응력확대계수 산출 방향은 Fig. 3 에서 확인할 수 있다.

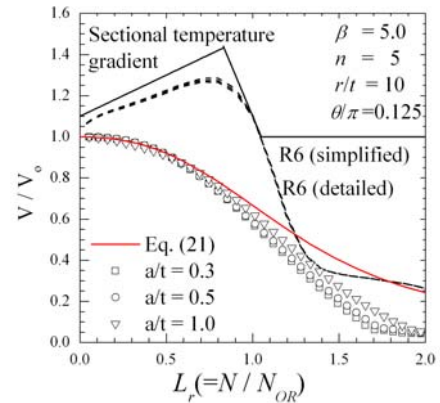
4. 유한요소 해석 결과

4.1 기계하중에 대한 L_r 정의

일반적으로 L_r 을 정의하기 위해서는 식 (2)에서와 같이 소성한계하중(Plastic limit load)을 사용하며 식 (4)와 같은 참조응력기반 파손평가선(FAL, Failure Assessment Line)은 재료의 인장 특성만의 함수이다.^(8,9) 따라서 균열 형상을 고려한 정확한 V-계수 평가를 위해 식 (18)과 같이 새로운 참조하중을 정의하였다.⁽⁹⁾



(a)



(b)

Fig. 10 Variations of V/V_0 with L_r for axial tension under sectional temperature gradient : (a) $\beta=0.5$ and (b) $\beta=5.0$

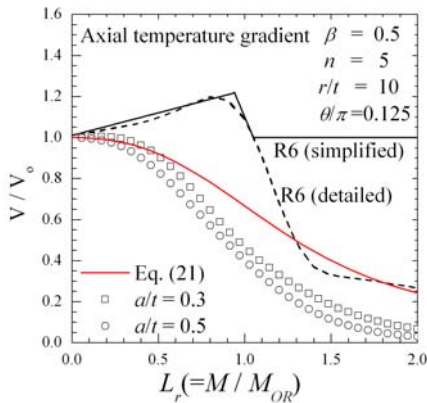
$$L_r = \frac{N}{N_{OR}} = \frac{M}{M_{OR}} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (18)$$

여기서 OR 은 최적화된 참조하중(optimized reference load)을 나타내면 인장 및 굽힘에 대한 N_{OR} 및 M_{OR} 은 식 (19), (20)과 같다.

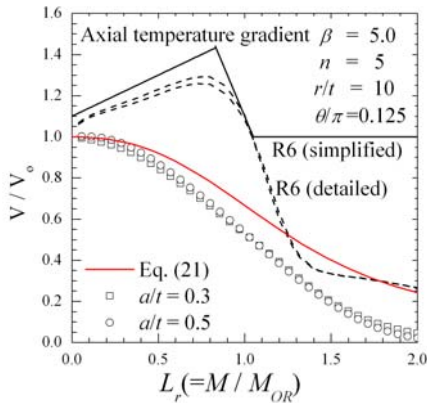
$$N_{OR} = \gamma \cdot (2\pi t \sigma_y) \left[1 - \frac{\frac{\theta^2 a}{t} + 2 \sin^{-1} \left(\frac{a \sin(\theta)}{t} \right)}{\pi} \right] \quad (19)$$

$$M_{OR} = \gamma \cdot (4r^2 t \sigma_y) \left[\cos \left(\frac{\theta a}{2t} \right) - \frac{a \sin(\theta)}{t} \right] \quad (20)$$

여기서 γ 는 소성한계하중에 대한 보정계수를 나타내며 유한요소해석을 통해 각각의 균열 형상에 대한 값을 구하였다. Fig. 7 은 인장하중을 받는 $n=5$ 및 20 인 재료에 대한 FAD 를 나타낸다. 그림에서와 같이 식 (19)를 통해 정의한 참조하중을 통해 기계하중에 대한 R6 제안식(식 (4)) 및 유한요소해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이 후 모든 해석 결과는 식 (18) 및 (19)를 통해 정의한 L_r 을 사용하였다.

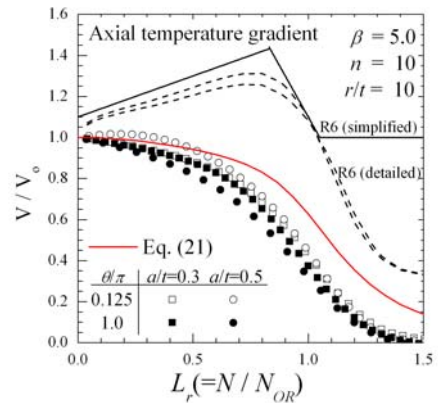


(a)

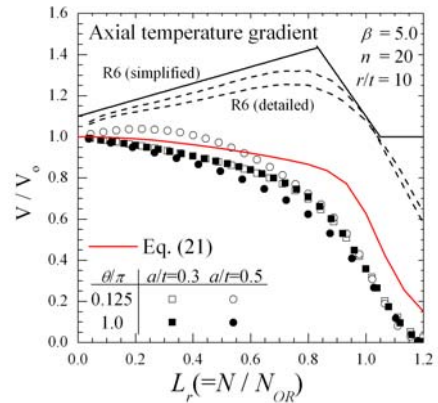


(b)

Fig. 11 Variations of V/V_0 with L_r for bending moment under axial temperature gradient : (a) $\beta=0.5$ and (b) $\beta=5.0$



(a)



(b)

Fig. 12 The effect of n on V/V_0 for axial temperature gradient with $\beta=5.0$: (a) $n=10$ and (b) $n=20$

4.2 균열 형상 및 하중 유형이 V/V_0 에 미치는 영향

Fig. 8 은 축 방향으로 온도구배가 있는 균열 배관에 $\beta=0.5, 1.0, 2.0$, 및 5.0 에 해당하는 열응력을 가할 때의 V/V_0 결과를 보여준다.

그림에서 심벌은 다양한 균열크기에 대한 V/V_0 유한요소 해석결과를 나타낸다. 그리고 3 개의 선은 V/V_0 에 대한 3 가지 예측식을 나타낸다. 그림에서 검은색 실선은 2.1.1 절에서 소개한 단순계산법을 통해 구한 V/V_0 를 나타내며 검은색 점선은 2.1.2 절에서 소개한 상세계산법을 통해 구한 V/V_0 곡선을 나타낸다. 그리고 붉은색 실선은 식 (21)을 나타낸다.

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2}{2} \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \right)^{-0.5} = f(L_r) \quad (21)$$

식 (21)은 식 (4)에서 정의된 FAL 을 V/V_0 예측식으로 사용한 것이다.

그림에서와 같이 유한요소 해석 결과는 균열 형상 및 열응력 크기에 대해 전반적으로 민감하지 않음을 알 수 있다. 또한 유한요소 해석 결과에 비해 단순계산법 및 상세계산법에서 제시하는 V-계수가 보수적임을 알 수 있으며 특히 간략계산법에 의한 결과가 더 보수적이다. 반면 FAL 을 통해 제시된 V/V_0 는 고려된 모든 β 에 대해 R6 제안식에 비해서는 보수성이 작았으며 유한요소 해석 결과에 대해서는 보수적이었다.

Fig. 9 는 원주 방향 온도구배에서 $\beta=0.5, 5.0$ 일 때 결과이다. Fig. 8 에서 확인했던 바와 같이 V/V_0 는 균열 크기에 둔감하였으며 β 의 크기에도 상대적으로 둔감하였다. 또한 $L_r=1$ 부근에서 지나치게 보수적인 R6 제안식에 비해 FAL 은 보수성이 줄어든 V/V_0 결과를 보여준다. 그러나 $\beta=0.5$ 및 작은 하중에서는 FAL 을 통해 정의한 V/V_0 가 부분적으로 비보수적임을 확인할 수 있다. 이러한 비보수성은 β 가 커지면서 줄어들며 $\beta \geq 2$ 에서 보수적으로 바뀐다.

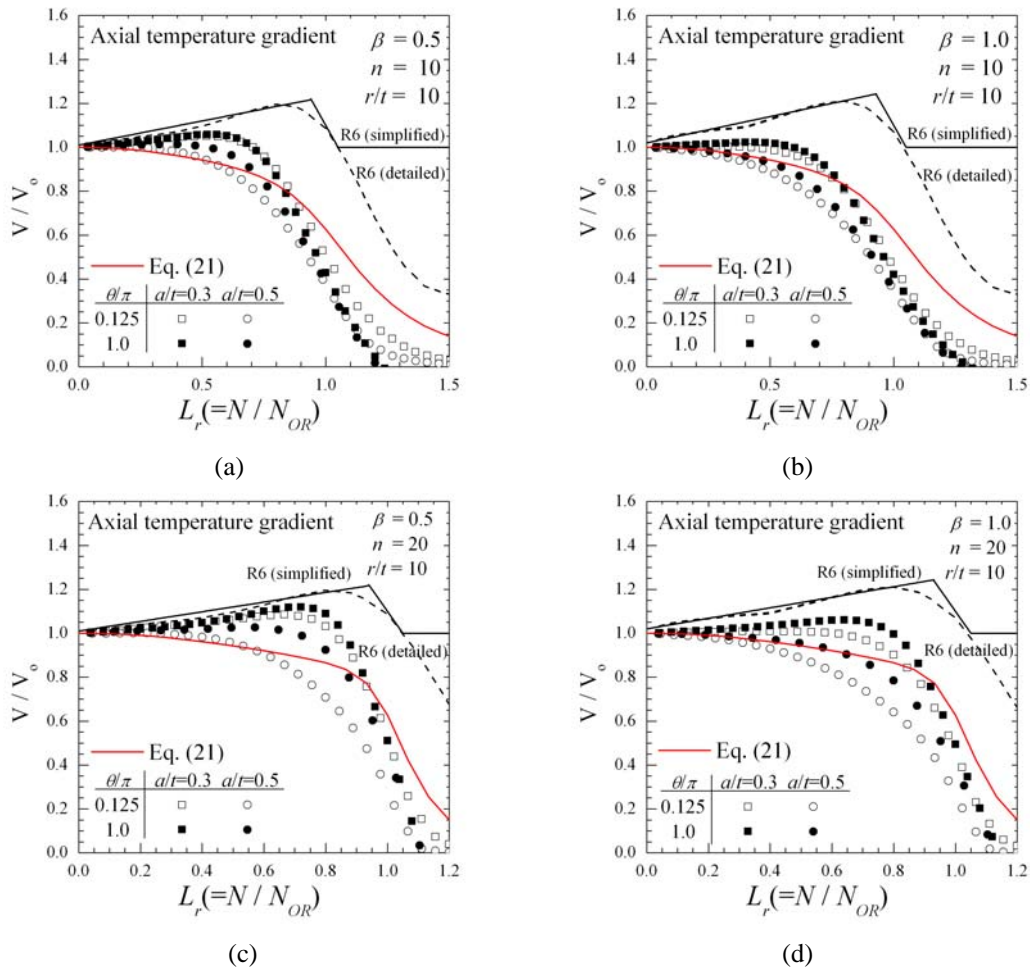


Fig. 13 The effect of n on V/V_0 for axial temperature gradient with $\beta=0.5$ and 1.0 : (a) and (b) $n=10$, (c) and (d) $n=20$

Fig. 8 및 9 에서의 경향은 단면에서의 온도구배 결과에서도 확인할 수 있었다(Fig. 10).

Fig. 11 은 축 방향 온도구배가 있는 배관이 굽힘하중을 받을 때 $\beta=0.5, 5.0$ 에 해당하는 결과다. 그림에서와 같이 굽힘하중에 대한 결과는 인장하중에 대한 결과와 유사하게 나타났으며 원주 방향 온도 구배 및 단면 내 온도 구배에 대해서도 동일한 결과를 보여주었다. 따라서 하중 모드가 V -계수에 미치는 영향도 미미하였다.

4.3 n 이 V/V_0 에 미치는 영향

4.2 절에서 소개한 모든 결과는 $n=5$ 에 대한 결과이다. Fig. 12 는 축 방향 온도 구배에서 $\beta=5.0$ 에 해당하는 열하중을 가할 때 $n=10$ 및 20 에 대한 V/V_0 를 나타낸다. 4.2 절에서와 같이 R6 제안식들은 해석결과에 비해 보수적인 결과를 제시하며 식 (21)은 R6 제안식에 비해 보수성이 줄어든 V/V_0 를 예측하고 있다. 그러나 이는 상대적으로 β 값이 큰 경우에 해당하는 결과이다.

Fig. 13 은 $n=10, 20$ 일 때 $\beta=0.5, 1.0$ 에 해당하는 결과이다. 그림에서와 같이 작은 하중 및 낮은 β ($\beta=0.5, 1.0$)에 대해서는 식 (21)이 부분적으로 비보수적인 것을 확인할 수 있으며 n 이 증가할 수록 비보수성은 증가한다. 이는 n 이 커질수록 기계하중 및 열하중의 상호작용이 쉽게 발생함을 의미한다. 반면 같은 조건에서 R6 의 보수성은 줄어들게 된다.

5. 결론

본 논문에서는 열하중 및 기계하중의 복합하중을 받는 원주방향 균열배관에 대해 V/V_0 계수를 계산하였다. V/V_0 는 유한요소 해석을 통해 구하였으며 해석 결과는 R6 에서 제시하는 간략계산법 및 상세계산법 결과와 비교하였다. 또한 FAL 을 이용하여 새로운 V/V_0 식을 제안하였다. 본 논문에서의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) V/V_0 는 균열 크기 및 열하중 유형, 기계하중

유형에 대해 민감하지 않은 결과를 보여주었다.

(2) V/V_0 는 열하중의 크기(β), 기계하중의 크기(L_r) 및 n 에 민감한 결과를 보여주었다.

(3) 본 연구에서 고려한 모든 경우에 대해 R6 코드에서 제시하는 V/V_0 는 보수적인 결과를 제시하였다. 보수성은 열하중 및 기계하중이 클 때 증가하였으며 특히 단순계산법은 2 차 하중의 소성완화현상의 고려하지 않기 때문에 $L_r > 1$ 에서 매우 보수적인 V/V_0 를 예측하였다.

(4) 반면 작은 열하중 및 기계하중이 작용하는 경우($\beta < 1$, $L_r < 1$) 소성 상호작용이 발생하여 V/V_0 는 1 보다 크게 나타난다. 이러한 현상은 n 이 커질수록 뚜렷이 나타나며 이 때 R6 에서 제안하는 V/V_0 는 비교적 정확한 결과를 제시한다.

(5) 전반적으로 R6 예측식은 보수적인 V/V_0 를 제시한다. 이러한 보수성을 줄이기 위해 본 논문에서는 FAL 을 이용한 V/V_0 식을 제안하였다. 그 결과 $\beta < 1$, $L_r < 1$ 을 제외한 영역에서는 R6 예측식에 비해 보수성이 줄어든 정확한 V/V_0 계수를 제안하는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

(1) Ainsworth, R.A., "The Treatment of Thermal and

Residual stresses in Fracture Assessments," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 24, pp. 65~76, 1986

(2) Anderson, T.L., 2005, *Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications-3rd edition*, CRC press (ch. 9)

(3) Mirzaee-Sisan, A., Truman, C.E., Smith, D.J. and Smith, M.C., 2007, "Interaction of Residual Stress with Mechanical Loading in a Ferritic Steel," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 2864~2880

(4) R6, Revision 4 : Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, British Energy Generation Ltd, 2006

(5) Stacey, A., Barthelemy, J.-Y. and Leggatt, R.H., "Ainsworth, R.A., 2000, "Incorporation of Residual Stresses into the SINTAP Defect Assessment Procedure," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, pp. 573~611

(6) Ainsworth, R.A. and Hooton, D.G., 2008, "R6 and R5 Procedures : The Way Forward," *Int. J. of Pres. Ves. and Piping*, Vol. 85, pp. 175~182

(7) Ainsworth, R.A., Sharples, J. K. and Smith, S.D., 2000, "Effects of Residual Stresses on Fracture Behavior-Experimental Results and Assessment Methods," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 35, No.4, pp. 307~315

(8) Kim, Y. J., Huh, N.S. and Kim, Y. J., 2001, "Defect Assessment Method for Welded Structures Based on Failure Assessment Diagram," *Journal of Korean Welding Society*, Vol. 19, pp. 466~473

(9) Song, T. K., Oh, C. K., Kim, Y. J., Kim, J. S. and Jin, T. E., 2007, "Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analyses for Circumferential Part-Through Surface Cracks at the Interface Between Elbows and Pipes," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No.6, pp. 710~717.