

# 원주방향 균열배관에 대한 열하중 및 기계하중의 상호 작용

송태광\* · 오창균\*\* · 김윤재†

Interaction of thermal stress with mechanical stress in circumferentially cracked pipe

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

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

## Abstract

For the cracked component under combined primary and secondary stress, an interaction between the loads occurs and the secondary stress is relaxed by the primary load. To account for this phenomena, R6 code provides the correction factor which is called V-factor. However, evaluation corrected with V-factor need to be examined for its conservatism. In this paper the conservatism of the current V-factor is examined for the circumferentially cracked pipe under the combined load and new evaluation method is proposed to reduce the conservatism.

### 기호설명

$K_I^P$	1 차 하중에 대한 응력확대계수
$K_J^P$	1 차 하중에 대한 유효응력확대계수
$K_I^{P+S}$	1, 2 차 복합하중에 대한 응력확대계수
$K_J^{P+S}$	1, 2 차 복합하중에 대한 유효응력확대계수
$L_r$	구조물에 작용하는 하중 비
$K_r$	파괴인성 비

## 1. 서론

균열 구조물에 열하중 및 기계하중을 동시에 발생하게 되면 기계하중에 의해 열응력이 완화되는 등 상호작용에 의한 효과가 나타나게 된다<sup>[1,2]</sup>. 따라서 R6 코드 등에서는 이를 고려하기 위해 V-계수를 도입하였다<sup>[3]</sup>. 그러나 최근 V-계수를 사용한 평가가 상호작용을 고려하지 않은 평가에 비해 보수적일 수 있다는 연구결과가 나왔다<sup>[4]</sup>. 따라서 본

논문에서는 열하중 및 기계하중을 받고 있는 원주방향 균열배관에 대해 균열 평가를 수행하였으며 코드에서 제시하는 보정계수의 보수성을 평가하였으며 코드의 보수성을 줄일 수 있는 새로운 평가식을 제안하였다.

## 2. V 계수 예측

R6 는 참조응력법(Reference Stress Method)을 기반으로 한다. 참조응력법에 사용되는 두 개의 변수인  $L_r$ (load ratio) 및  $K_r$ (K ratio)은 다음과 같다.

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

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

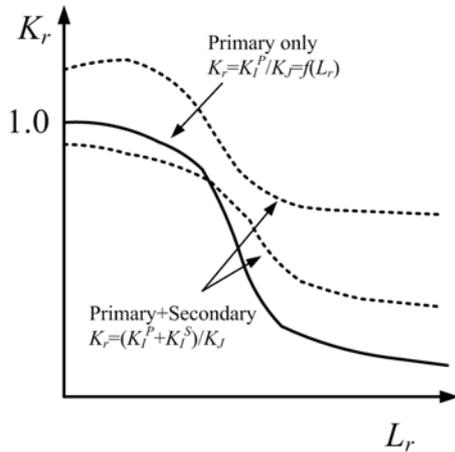
여기서  $K_I^P$  는 1 차 하중이 작용할 때의 응력확대계수(Stress Intensity Factor)를 나타내며  $K_J^P$  는 J-적분에 해당하는 유효응력확대계수로서 Eq. (3)과 같다.

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

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

\* 고려대학교 기계공학부(원)

\*\* 한국전력기술(주)



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

Eq. (3)에서  $E'$ 는 탄성계수를 나타내며 평면응력 조건에서는  $E'=E$ , 평면변형을 조건에서는  $E'=E/(1-\nu^2)$ 이다. 또한  $J^P$ 는 1 차 하중 하에서의  $J$ -적분을 나타낸다. Eq. (2)에서  $N_L$  및  $M_L$ 은 인장 및 굽힘 하중을 받는 균열 구조물에 대한 한계 하중(limit load)을 나타낸다. 참조응력을 통해서 Eq. (1)은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

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

Eq. (4)에서  $\varepsilon_{ref}$ 는 재료의 인장곡선에서  $\sigma_{ref}$ 에 해당하는 변형율이다. Fig. 1에서 실선은 1 차 하중만 작용하는 균열 구조물에 대한 일반적인 파손평가도(FAD, Failure Assessment Diagram)를 나타낸다.

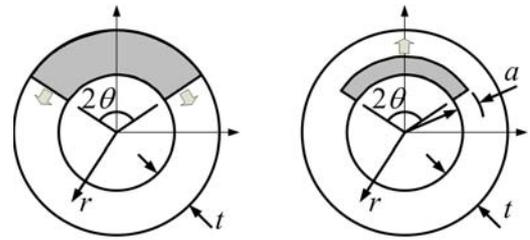
복합하중이 작용하는 균열 구조물에 대한  $K_r$ 은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{K_I^{P+S}}{K_J^{P+S}} = \frac{(K_I^P + K_I^S)}{K_J^{P+S}} = f(L_r) \quad (5)$$

여기서  $K_I^{P+S}$ 는 복합하중하에서의 응력확대계수를 나타내며  $K_I^S$ 는 2 차 하중만 작용할 때의 응력확대계수를 나타낸다. 그리고  $K_J^{P+S}$ 는 복합하중하에 대한 유효응력확대계수를 나타낸다.

R6 등에서는  $V$ -계수를 도입하여 Eq. (5)를 Eq. (7)과 같이 재 정의 하였다.

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



⇨ : J calculation direction

(b)

**Fig. 2** circumferential through-wall and part-through surface cracks

따라서  $V$ -계수를 알 수 있다면 복합하중이 작용하는 구조물에 대해 유효응력확대계수( $K_I^{P+S}$ )를 간편하게 구할 수 있다.

R6에서는  $V$ -계수를 단순계산법 및 상세계산법으로 제시하고 있으며 Eq.(9) 및 (10)과 같다<sup>[3,4]</sup>.

$$V = \begin{cases} 1+0.2L_r+0.02\beta(1+2L_r) & \text{for } L_r < L_r^* \\ 3.1-2L_r & \text{for } L_r^* < L_r < 1.05 \\ 1 & \text{for } L_r > 1.05 \end{cases} \quad (9)$$

$$V = \zeta V_o \quad (10)$$

단순계산법에서  $\beta$ 는 일차하중에 대한 이차하중의 비를 나타내며 Eq. (11)과 같다.

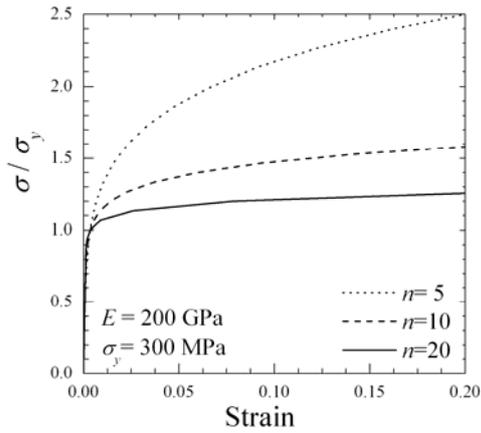
$$\beta = \frac{K_I^S}{(K_I^P / L_r)} \quad (11)$$

상세계산법에서  $\zeta$ 는  $L_r$  및  $K_I^S/(K_I^P/L_r)$ 의 함수로서 R6에서는 표를 통해 제시한다.

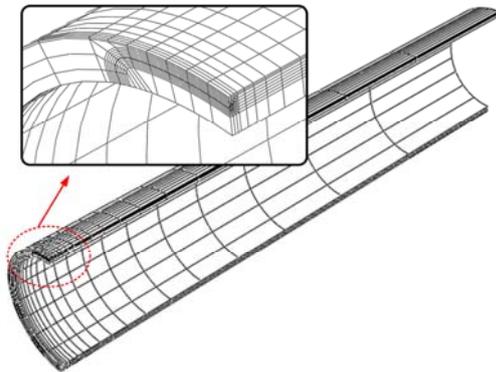
반면 유한요소 해석을 통해서  $V$  및  $V/V_o$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{V}{V_o} = \sqrt{\frac{J_e^P}{J^P}} \left( \sqrt{\frac{J^{P+S}}{J^P}} - 1 \right) = \frac{K_I^P}{K_J^S} \left( \frac{K_I^{P+S}}{K_J^P} - 1 \right) \quad (12)$$

$$V = \sqrt{\frac{J_e^P}{J_e^S}} \left( \sqrt{\frac{J^{P+S}}{J^P}} - 1 \right) = \frac{K_I^P}{K_I^S} \left( \frac{K_J^{P+S}}{K_J^P} - 1 \right) \quad (13)$$



**Fig. 3** (a) Tensile curve for three different hardening materials and (b) corresponding failure assessment curve



**Fig. 4** FE mesh for circumferential part-through surface cracked pipe

### 3. 유한요소 해석

#### 3.1 형상 변수 및 재료 물성

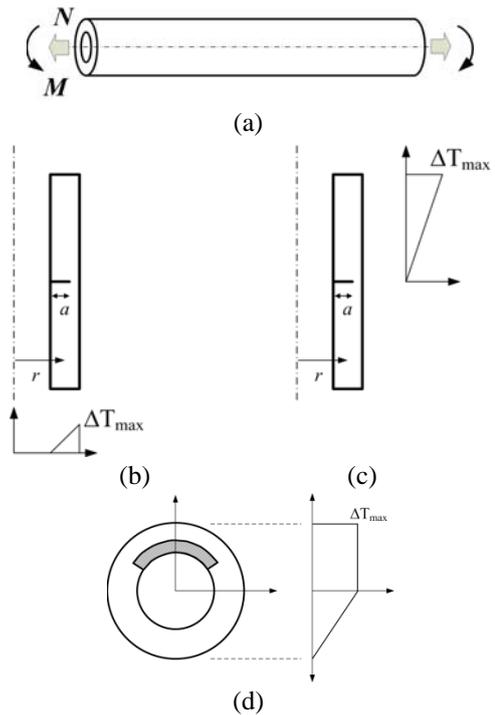
Fig. 2 는 원주방향 관통 및 표면 균열 배관에 대한 단면도를 나타내며 균열 크기로는  $\theta/\pi=0.125\sim 1.0$ ,  $a/t=0.3\sim 1.0$  을 고려하였다.

재료는 Ramberg-Osgood 식을 통해 표현하였으며 0.2% 율셋 항복강도( $\sigma_y$ ) 및 탄성계수는 각각 300MPa 및 200GPa 를 사용하였다. 소성경화지수( $n$ ) 는 3 개의 값을 고려하였다. ( $n=5, 10, 20$ ). 재료 물성과 관련된 식은 Eq. (14) 및 (15)와 같다.

$$\frac{\epsilon}{(\sigma_y/E)} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{0.002E}{\sigma_y} \left( \frac{4}{3} \right) \quad (15)$$

재료 물성은 Fig. 3 에서 확인할 수 있다.

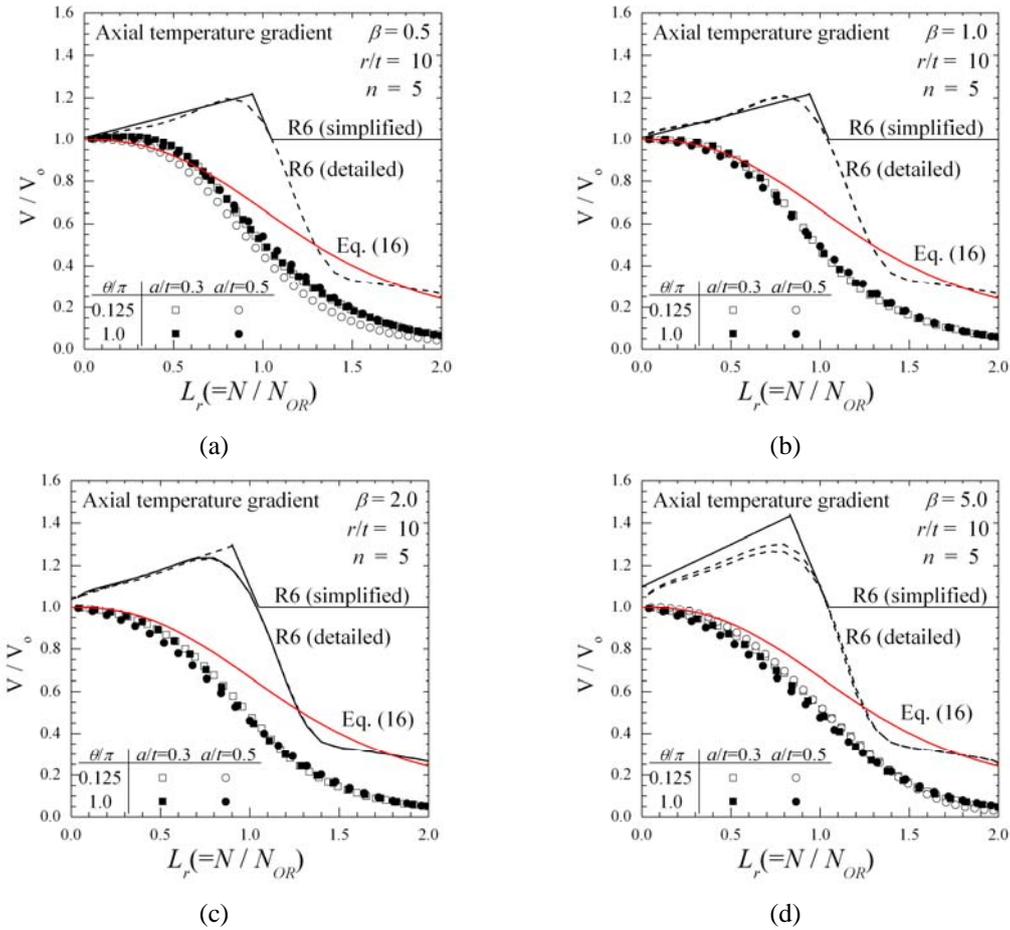


**Fig. 5** Pipe under mechanical load((a) and thermal load((b), (c) and (d)). (b) shows radial temperature gradient, (c) axial temperature gradient and (d) sectional temperature gradient.

유한요소 모델은 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. 4 에서 확인할 수 있다.

#### 3.2 하중 조건

기계하중은 Fig. 5(a)에서와 같이 축방향 인장 및 굽힘하중을 고려하였으며 열하중은 원주 방향 온도 구배 분포, 축 방향 온도 구배 분포 및 단면에서의 온도 구배 분포를 고려하였다. Fig. 5(b), (c) 및 (d)는 각각의 온도 분포를 도식적으로 보여주고 있으며 온도 분포는 선형 또는 또는 상수분포를 나타낸다. 그림에서  $\Delta T_{max}$  는 최대 온도를 나타내며  $\beta$  정의에 따라 달라진다. 본 논문에서는 각각의 온도 분포에 대해 네 가지  $\beta$ 를 고려하였다 ( $\beta=0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ ).



**Fig. 6** Variations of  $V/V_o$  with  $L_r$  for axial tension with axial temperature gradient : (a)  $\beta=0.5$ , (b)  $\beta=1.0$ , (c)  $\beta=2.0$  and (d)  $\beta=5.0$

#### 4. 유한요소 해석 결과

Fig. 6 은 축 방향으로 온도구배가 있는 균열 배관에  $\beta=0.5, 1.0, 2.0$ , 및  $5.0$  에 해당하는 열응력을 가할 때의  $V/V_o$  결과를 보여준다. 그림에서 심별은 유한요소 해석 결과이며 3 개의 선은 예측식을 나타낸다. 2 개의 예측식은 2 장에서 언급하였던 R6 제안식이며 나머지 선은 본 연구에서  $V/V_o$  계산을 위해 제안한 식으로 FAL 을 예측식을 사용한 것이다.

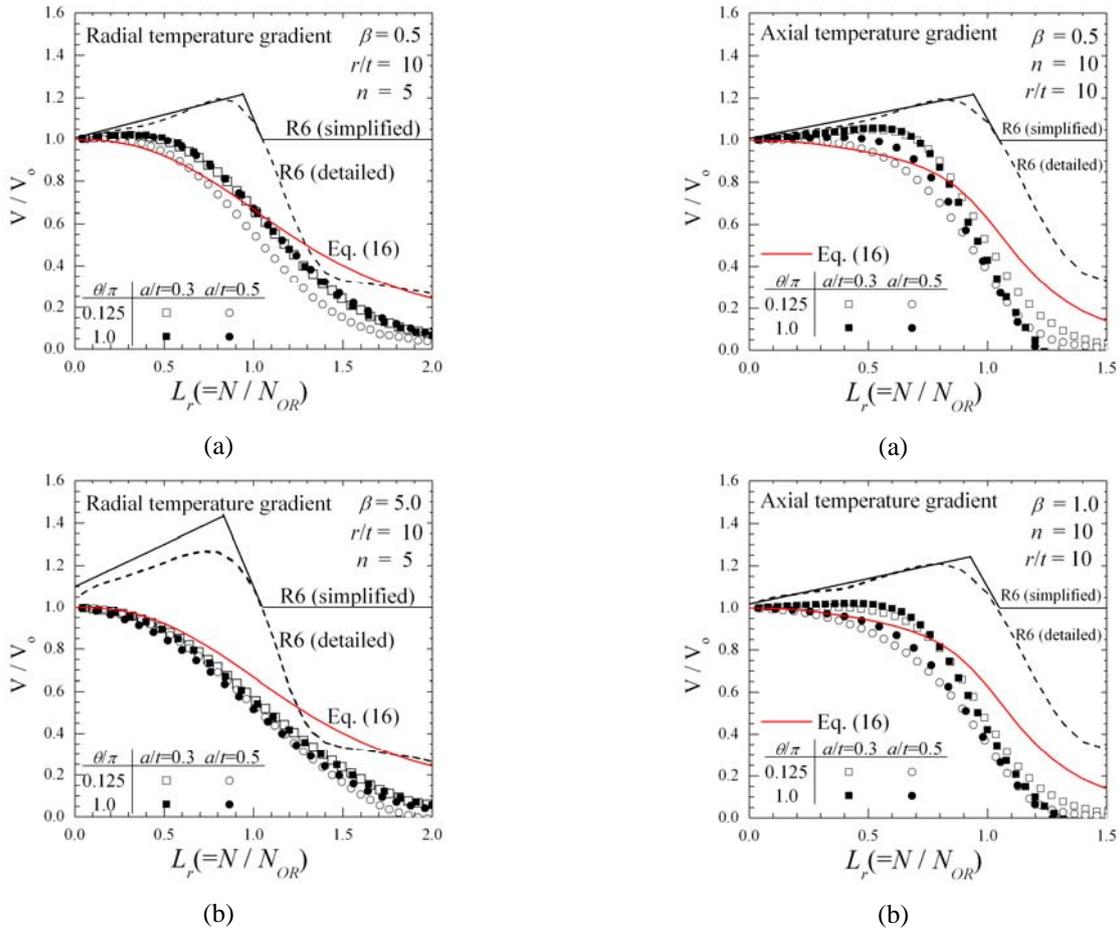
$$\frac{V}{V_o} = \left( \frac{E\varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2}{2} \frac{\sigma_{ref}}{E\varepsilon_{ref}} \right)^{-0.5} = f(L_r) \quad (16)$$

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  $V/V_o$  는 고려된 모든  $\beta$ 에 대해 R6 제안식에 비해서는 보수성이 작았으며 유한요소 해석 결과에 대해서는 보수적이었다.

Fig. 7 은 원주 방향 온도구배에서  $\beta=0.5, 5.0$  일 때 결과이다. Fig. 6 에서 확인했던 바와 같이  $V/V_o$  는 균열 크기에 둔감하였으며  $\beta$ 의 크기에 상대적으로 둔감하였다. 또한  $L_r=1$  부근에서 지나치게 보수적인 R6 제안식에 비해 FAL 은 보수성이 줄어든  $V/V_o$  결과를 보여준다. 이러한 경향은 단면 내 온도구배에 대한 결과에서도 확인할 수 있었다.

따라서 온도 구배의 영향은 미미한 것으로 확인되었다. 또한 인장 하중이 아닌 굽힘하중에서도 지금까지 살펴본 결과에서와 동일한 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 하중 모드가  $V$ -계수에 미치는 영향도 미미하였다.

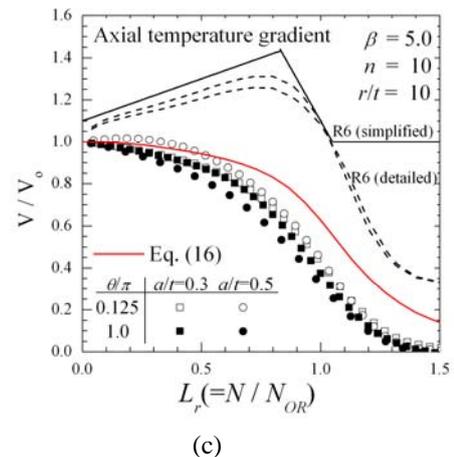


**Fig. 7** Variations of  $V/V_0$  with  $L_r$  for axial tension under radial temperature gradient : (a)  $\beta=0.5$  and (b)  $\beta=5.0$

Fig. 8 은 축 방향 온도 구배에서  $\beta=0.5, 1.0, 5.0$  일 때  $n=10$  에 대한  $V/V_0$  를 나타낸다. 그림에서와 같이 작은 하중 및 낮은  $\beta$  ( $\beta=0.5, 1.0$ )에 대해서는 Eq. (16)이 부분적으로 비보수적인 것을 확인할 수 있으며  $n$  이 증가할 수록 비보수성은 증가한다. 이는  $n$  이 커질수록 기계하중 및 열하중의 상호작용이 쉽게 쉽게 발생함을 의미한다. 반면 같은 조건에서 R6 의 보수성은 줄어들게 된다. 이러한 경향은  $n=20$  에서도 확인되었으며 낮은  $L_r$  및  $\beta$ 에서의 비보수성은  $n=10$  에 비해 증가하였다. 따라서  $V/V_0$  는 재료의 소성경화지수에 민감함을 알 수 있다.

**5. 결론**

본 논문에서는 열하중 및 기계하중의 복합하중을 받는 원주방향 균열배관에 대해  $V/V_0$  계수를 계산하였다. 해석 결과는 R6 코드의 제시식과 비교하였으며 또한 FAL 을 이용하여 새롭게 제안한  $V/V_0$  식의 보수성을 확인하였다. 본 논문에서의 연구 결과는 다음과 같다.



**Fig. 8** The effect of  $n$  on  $V/V_0$  for axial temperature gradient with  $n=10$  : (a) $\beta=0.5$ , (b) $\beta=1.0$  and (c)  $\beta=5.0$

- (1)  $V/V_0$  는 균열 크기 및 열하중 유형, 기계하중 유형에 대해 민감하지 않았다.
- (2)  $V/V_0$  는 열하중의 크기(b), 기계하중의 크기 ( $L_r$ ) 및  $n$  에 민감하였다.
- (3) R6 코드에서 제시하는  $V/V_0$  는 보수적인 결과를 제시하였다. 보수성은 특히 열하중 및 기계하중이 클 때 증가하였다.

- (4) 작은 열하중 및 기계하중이 작용하는 경우 ( $\beta < 1, L_r < 1$ ) 소성 상호작용에 의해  $V/V_o$ 는 1보다 크게 나타난다. 이러한 현상은  $n$ 이 커질수록 뚜렷이 나타나며 이 때 R6는 비교적 정확한  $V/V_o$ 를 제시한다.

### 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) T.L. Anderson, 2005, Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications-3<sup>rd</sup> edition, CRC press (ch. 9)
- (3) R6, Revision 4 : Assessment of the integrity of structures containing defects, British Energy Generation Ltd, 2006
- (4) Ainsworth, R.A., Hooton, D.G., 2008, "R6 and R5 procedures : The way forward", *Int. J. of Pres. Ves. and Piping*, Vol.85, pp. 175~182