<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.5.631 ISSN 1226-4873

원주방향 균열 배관에 대한 R6, RCC-MR A16 코드에 의한 1,2 차 복합 하중하에서 J-적분 비교

남현석* · 오창영* · 김윤재*†
* 고려대학교 기계공학부

J-Integral Estimate for Circumferential Cracked Pipes Under Primary and Secondary Stress in R6, RCC-MR A16

Hyun Suk Nam*, Chang Young Oh* and Yun Jae Kim*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 3, 2012 ; Revised February 7, 2013 ; Accepted February 13, 2013)

Key Words: Primary Stress(1 차 하중), Secondary Stress(2 차 하중), J-Integral(J-적분), V-Factor(V-계수), Reference Stress(참조 응력)

초록: 본 논문에서는 R6 코드와 RCC-MR A16 코드에서 원주방향 균열 배관에 대해 제시하는 1,2 차 복합 하중하에서 J-적분 계산법에 대한 정량적인 비교를 하였다. 균열의 형상, 균열의 깊이, 2 차 하중의 크기 변수에 대한 유한요소 해석을 수행 하였고 유한요소 해석 결과를 이용해 각 코드의 J-적분 평가법에 대한 정량적인 비교를 하였다. R6 코드는 L_r=1 부근에서 보수적으로 평가 되었으며 RCC-MR A16 코드의 경우 기계하중이 작은 영역에서 보수적으로 평가되었다. 이와 같은 결과를 토대로 본 논문에서는 원주방향 균열이 있는 배관에 대하여 각 코드의 J-적분 계산을 보완할 수 있는 방법을 제시하였다. 그 결과로 보완된 J-적분 계산이 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것을 확인 하였다.

Abstract: This paper provides a comparison of the J-integral estimation method under combined primary and secondary stress in the R6, RCC-MR A16 code. The comparisons of each code are based on finite element analysis using ABAQUS with regard to the crack shape, crack depth, and magnitude of secondary load. The estimate of the R6 code is conservative near L_r = 1, and that of the RCC-MR A16 code is conservative near L_r = 0. As a result, this paper proposes a modified method of J-integral estimation in the R6, RCC_MR A16 code. The J-integral using the modified method corresponds to the finite element analysis result.

- 기호설명 -

K	: 응력확대계수
L_r	: 구조물에 작용하는 하중 비
a	: 균열 깊이
t	: 배관의 두께
r_m	: 배관의 평균 반지름
E	: 탄성계수
n	: 가공 경화지수
σ_{ref}	: 참조 응력
ε_{ref}	: 참조 변형률

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
ⓒ 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

원자력 발전소 및 많은 플랜트 시설에 사용 되는 배관은 인장, 굽힘 등의 기계하중(1 차 하중)과 온도구배 등에 의한 열 하중(2 차 하중) 등 다양한 종류의 하중을 동시에 받고 있다. 기계하중은 하중 제어를 받는 대표적인 1 차 하중이며, 열 하중은 변위 제어를 받는 대표적인 2 차 하중 중의 하나 이다. 이러한 1,2 차 하중이 복합적으로 작용할 때에는 상호작용에 의한 열 응력 완화 효과 또는 탄성추종현상과 같은 응력 재분배 효과를 수반하게 된다.[1~5] 따라서 1,2 차 하중이 동시에 작용하는 배관의 건전성 평가하는 경우에는 복합 하중에 의한 응력 재분배 효과를 고려하여 평가 해야

한다. 이러한 배관에 대한 건전성 평가 방법에는 파괴역학에 입각한 방법이 있다. 파괴역학에는 선형 파괴역학만을 고려한 선형 탄성 파괴역학과 선형 탄성 파괴역학의 적용 제한성을 보완하기 위해 제시 된 비선형 파괴역학인 탄·소성 파괴역학이 존재 한다. 이러한 탄·소성 파괴역학적 관점에서 배관의 건전성 평가를 할 때는 배관의 인장 물성 이외에 J-적분과 파괴 인성과 같은 추가적인 정보를 필요로 하고 있다. 실험을 통해 얻은 파괴인성과 실 구조물에 대한 J-적분 예측값과의 비교를 통해 배관에 대한 건전성 평가를 수행하게 된다 미국과 유럽등과 같은 원자력기술 선진국의 많은 기관에서는 이러한 실 구조물에 대한 J-적분 평가법을 제시하고 있다. 대표적으로 영국의 EDF energy 에서는 R6 코드[6]를 제시하고 있고, 프랑스의 EDF energy, AREVA 및 CEA 에서는 RCC-MR A16 코드[7]를 제시하고 있다. 이러한 코드들에서는 복합 하중하에서 1 차 응력에 의한 2 차 응력 완화 효과가 고려된 J-적분 계산법을 제시하고 있다. 세계적으로 많은 원자력 발전소가 건설되고 있을 뿐만 아니라, 많은 국가들이 원자력 발전소를 수출하고 있는 상황에서 각 국의 원자력 발전소 관련 기관에서는 서로 다른 코드를 이용해 원자력 발전소를 설계 및 운용하고 있다. 각 기관별로 균열 배관에 대한 J-적분 값의 다른 예측은 허용 균열 크기의 차이를 가지고 오게 되어 결함이 발생한 배관에 대한 건전성 평가를 할 때 상이한 평가가 이루어 질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 R6 코드와 RCC-MR A16 코드의 2 차 응력재분배 효과를 고려한 J-적분 평가법과 유한요소해석을 이용한 결과값과의 정량적인 비교를 하였다. 각 균열 형상 별로 R6 와 RCC-MR A16 코드 간의 J-적분 예측값의 정확성을 비교하여, 각 코드의 평가법의 경향에 대해 확인하였고, 각 코드의 J-적분 예측값의 정확성을 높일 수 있는 방법을 제시하였다.

2. R6 코드를 이용한 *J*-적분 예측

2.1 참조응력법 기반 기계하중 정의

R6 코드는 Ainstworth, RA 에 의해 제시된 참조응력법(Reference stress method)에 기반하여 기계하중을 정의하고 있다. 참조 응력법은 가상의 참조응력을 설정하여 국부적인 응력 분석을 간소화 하여 평가하는 방법으로, 전체적인 하중비와 국부적인 응력비와의 관계를 식 (1)에서 정의 하였다.

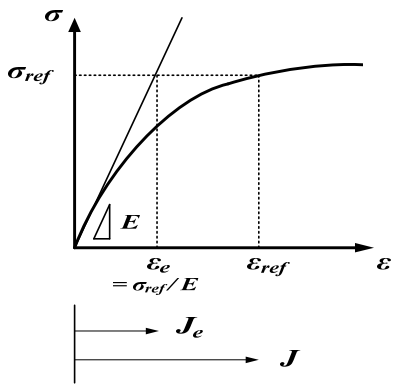


Fig. 1 Concept of J-integral estimation using reference stress method

$$L_r = \frac{N}{N_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \tag{1}$$

위 식에서 σ_{ref} 는 참조응력을 나타내며. σ_y 는 항복응력, N_L 는 배관의 한계하중을 나타낸다. 본 논문에서는 R6 코드에서 제시하는 소성한계하중법에 따라 계산 하였으며, 원주방향 균열만을 고려 하였다. 식 (2)는 참조응력법을 이용한 J-적분 평가법으로 Fig. 1 과 같은 과정을 통해 유도되었다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{\varepsilon_{ref}}{\varepsilon_e} = \frac{E \cdot \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} \tag{2}$$

이 때의 수식은 균열 선단부의 소성영역이 보정되지 않은 수식으로 소성영역이 보정된 J-적분 평가식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{J}{J_e} = \frac{E \cdot \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2}{2} \frac{\sigma_{ref}}{E \cdot \varepsilon_{ref}} \tag{3}$$

식 (3)에서 σ_{ref} 와 ε_{ref} 은 Fig. 1 에서 확인 할 수 있듯이 참조 응력과 참조 변형률을 의미한다.

2.2 *V*-factor 계수 계산

J-적분값은 선형 탄성재료에서 응력확대 계수인 K^p 와 식 (4)와 같은 관계를 가지고 있다.

$$J_e^p = \frac{(K^p)^2}{E'} \tag{4}$$

식 (4)에서 E'는 탄성계수를 나타내며 평면응력 조건에서는 $E'=E$, 평면 변형률 조건에서는 $E'=E/(1-\nu^2)$를 나타낸다. 또한 $J_e{}^p$ 는 1 차 하중하에서의 J-적분을 나타내며, K^p 는 1 차 하중하에서의 응력확대계수(stress intensity factor)를 나타낸다.

선형 탄성 재료에서 1,2 차 복합 하중이 작용 할 때의 J-적분값은 응력확대계수가 탄성계산에 의해 산출되므로 중첩의 원리가 적용되어 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_e^{p+s} = \frac{(K^p + K^s)^2}{E'} \quad (5)$$

식 (5)에서 K^s 는 2 차 하중이 작용할 때의 응력확대계수를 나타낸다. 그러나 복합작용이 작용할 때에는 1,2 차 하중의 상호 작용에 의하여 실제 J-적분 값과 차이가 발생하게 된다. 이와 같은 차이에 대한 보정을 위해 R6 코드에서는 V-계수를 도입하여 식 (5)를 식 (6)으로 재정의 하였다.

$$J_{eff}^{p+s} = \frac{(K^p + V \cdot K^s)^2}{E'} \quad (6)$$

R6 코드에서는 2 차 하중의 응력 재분배 효과를 보정하는 계수로 V-계수를 제시하고 있다. 이와 함께 R6 코드에서는 2 차 하중의 크기를 무차원 변수인 β_1 를 통해 1 차 하중에 대한 2 차 하중의 비를 나타낼 수 있도록 제시하고 있으며 β_1 의 정의는 식 (7)에 제시하였다.

$$\beta_1 = \frac{K_I^S}{(K_I^P / L_r)} \quad (7)$$

2.2.1 단순계산법(Simplified method)

R6 코드에서는 V-계수를 예측하는 방법으로 총 2 가지를 제시하고 있다. 그 중 단순계산법은 2 차 하중의 크기가 β_1<4 인 경우에 사용되는 방법으로 탄성계산을 바탕으로 계산이 이루어 진다. 단순 계산법에서 제시하는 V-계수 함수는 L_r 및 β_1 의 함수로 식 (8)과 같다.

$$V = \begin{cases} 1+0.2L_r+0.02\beta_1(1+2L_r) & for \quad L_r < L_r^* \\ 3.1-2L_r & for \quad L_r^* < L_r < 1.05 \\ 1 & for \quad L_r > 1.05 \end{cases} \quad (8)$$

L_r^*는 첫번째 식과 두번째 식이 만나는 지점의 L_r 를 의미한다. 단순 계산법은 L_r 과 β_1 만 알면 V-계수를 예측할 수 있는 방법으로 L_r 이 1.05 보다 큰 경우 2 차 응력에 의한 응력 재분배효과를 고려하지 않는 가장 보수적인 방법이다.

2.2.2 상세계산법(Detailed method)

상세계산법은 단순계산법과 달리 2 차 하중과 관련된 탄·소성 해석을 바탕으로 하여 V-계수를 예측한다. 따라서 R6 코드에서는 2 차 하중이 작용할 때의 선형 탄성 재료에서의 J-적분과 탄·소성 재료의 J-적분값의 매개변수로 V_o 를 제시하고 있으며 식 (9)와 같다

$$V_o = \frac{\sqrt{E' J^s}}{K^s} = \sqrt{\frac{J^s}{J_e^s}} \quad (9)$$

위 식에서 J^s 는 탄·소성재료의 J-적분값으로 식 (10)와 같이 유효응력확대계수 $K_J{}^s$ 로 나타낼 수 있다.

$$J^s = \frac{(K_J^s)^2}{E'} \quad (10)$$

R6 코드에서는 $K_J{}^s$ 를 구하는 방법으로 세가지 방법을 제시하고 있다. 본 논문에서는 그 중 하나인 유한요소해석을 이용해 $K_J{}^s$ 를 구하였다. 상세계산법에서 V-계수는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \zeta \cdot V_O \quad (11)$$

식 (11)에서 ζ 는 L_r 및 $K_J{}^s/(K_I{}^p/L_r)$의 함수로서 R6 코드에서 제시하고 있다.

2.3 복합 하중 J-적분 계산

R6 코드에서는 복합 하중하에서 2 차 응력의 응력 재분배 효과를 V-계수를 이용해 반영하고 있다. 참조응력법에 기반하여 제시된 식 (3)과 V-계수를 이용해 복합 하중하에서 선형 탄성재료에 대한 J-적분을 구한 식 (6)을 이용해 비선형 재료에서의 J-적분을 아래와 같이 계산 할 수 있다.

$$J^{p+s} = \frac{(K_I^p + V \cdot K_I^s)^2}{E'} \left(\frac{E \cdot \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + \frac{L_r^2}{2} \frac{\sigma_{ref}}{E \cdot \varepsilon_{ref}} \right) \quad (12)$$

3. A16 코드를 이용한 J-적분 예측

3.1 1 차 하중을 고려한 J-적분 계산법

RCC-MR A16 코드에서는 1 차 하중이 작용 할 때 J-적분 계산법을 MLL option 과 EPS option 총 2 가지로 제시하고 있다.

3.1.1 MLL option

MLL option 은 R6 코드와 마찬 가지로 참조응력법에 기반을 두고 있는 계산법이다. 따라서 식 (1)과 같이 가상의 참조 응력을 설정하여 국부적인 응력 분석을 하중비로 간소화 하여 나타낼 수 있다. 한계하중법을 제시하고 있는 R6 와 달리 RCC-MR A16 코드에서는 기계하중 및 형상에 따른 L_r 값을 통해 참조응력법을 정의하고 있다. 축 방향 인장하중, 굽힘 하중, 내압 등과 같은 1 차 하중의 종류에 따라 L_r 값이 달라지며, 본 논문에서는 축 방향 인장하중만을 고려하였으므로 식 (13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_r = \frac{n_1}{q_n \cdot \mu_{en} \cdot \mu_t} \quad (13)$$

식 (13)에서 n_1 은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있으며, q_n, μ_{en}, μ_t는 A16 코드에서 각 균열 형상별로 제시하고 있다.

$$n_1 = \frac{N_1}{2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot h \cdot \sigma_y} \quad (14)$$

식 (14)에서 r_m 은 배관의 평균 반지름을 의미하며, h 는 배관의 두께, N_1 은 축방향 인장 하중을 의미한다. MLL option 에서는 이와 같은 과정을 통해 계산된 L_r 값을 이용하여 참조 응력과 참조 변형률을 정의하여 J-적분 계산법을 식 (15)와 같이 제시하고 있다.

$$J_s = J_{el}^{me} \left[\frac{E \cdot \varepsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} + 0.5 \cdot \left[\frac{{\sigma_{ref}}^2}{{\sigma_{ref}}^2 + {\sigma_y}^2} \right] \right] \quad (15)$$

식 (15)에서 J_{el}^{me} 는 1 차 하중이 작용할 시에 탄성 재료에서의 J-적분을 의미하며, σ_{ref}, ε_{ref} 는 각각 참조 응력과 참조 변형률을 의미한다.

3.1.2 EPS option

EPS option 은 앞서 언급한 참조응력법에 기반한 MLL option 과 달리 탄성과 탄·소성 등가응력에 따른 참조응력을 계산하여 1 차 하중하에서 J-적분을 계산하게 된다. EPS option 을 적용 하기 위해선 재료의 응력-변형률 선도를 필요로 한다. Fig. 2 는 이러한 계산 과정을 도식화 하여서 나타낸 그림이다. 탄성 및 탄·소성 등가응력을 구하는 계수는 RCC-MR A16 코드에서 각 균열 형상 별로 제시하고 있다. EPS option 에서는 이와 같은 과정을 통해 참조 응력과 참조 변형률을 구한 뒤 식 (16)과 같은 J-적분 계산법을 제시하고 잇다.

$$J_s = J_{el}^{me} \cdot \frac{E \cdot \varepsilon_{ref}^{me}}{\sigma_{ref}^{me}} \quad (16)$$

3.2 2 차 하중을 고려한 J-적분 계산법

RCC-MR A16 코드에서는 2 차 하중이 작용 하는 경우에 대한 J-적분 예측법으로 k_{th1} option 과 k_{th2} option 으로 두 가지를 제시하고 있다. 본 논문에서는 k_{th1} option 의 경우 배관 안에 흐르는 유체의 온도에 대한 정보를 필요로 하고 있어 고려하지 않았고, k_{th2} option 만을 고려 하였다.

3.2.1 k_{th2} option

k_{th2} option 는 $r/t > 3$ 인 경우에 적용이 가능하며, 각 균열 형상 별로 관련 계수를 제시하고 있는

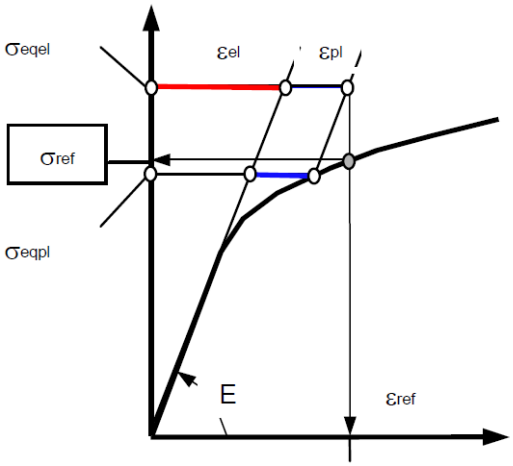


Fig. 2 Concept of EPS option in RCC-MR A16 code

특징이 있다. k_{th2} option 은 탄성 열 응력을 구한 뒤 탄성추종현상(elastic follow up)효과를 반영한 r^{th} 계수를 통해 참조 응력을 계산하는 방법으로 Fig. 3 에 도식화하여 나타내었다. r^{th} 계수는 RCC-MR A16 코드에서 균열 형상 별로 제시하고 있다. k_{th2} option 에서 탄성 열 응력은 식 (17)을 이용해 구할 수 있다.

$$\sigma_{el}^{th} = 0.585 \cdot \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T_1}{2 \cdot (1-\nu)} \cdot \left[1 + \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \cdot \left(\frac{2.86}{n} - \frac{0.86}{n^2} \right) \right] \cdot f_{th} \quad (17)$$

식 (17)에서 $\triangle T_1$ 는 그림 Fig 4 에서 확인 할 수 있듯이 원주방향 선형 온도구배를 의미하며, $\triangle T_2$ 는 원주방향 비선형 온도구배를 의미한다. f_{th} 는 각 균열 형상 별로 RCC-MR A16 코드에서 제시하는 계수이다. n 은 가공 경화 지수를 의미하며 α 는 열팽계수를 의미한다. 위와 같은 과정을 통해 열 응력에 해당하는 참조응력과 참조 변형률을 구한 뒤 RCC-MR A16 에서 제시하는 식 (18)을 이용해 k_{th2} 계수를 구한 뒤 식 (19)를 이용해 2 차 하중하에서 탄·소성 J-적분을 계산 하였다.

$$[k_{th2}]^2 = \left[\frac{\sigma^{th}}{\sigma_{el}^{th}} \right]^2 \cdot \left[\frac{E \cdot \varepsilon_{ref}^{th}}{\sigma_{ref}^{th}} \right] \quad (18)$$

$$J_s = J_{el}^{th} \cdot [k_{th2}]^2 \quad (19)$$

3.3 복합 하중 하에서 J-적분 계산법

RCC-MR A16 코드에서는 1,2 차 복합 하중하에서 J-적분 계산법을 k_{th}^*계수를 통해 제시하고 있다. 식 (20)은 RCC-MR A16 코드에서 제시하는 J-적분 계산 식이다.

$$J_s = \left[\sqrt{J^{me}} + k_{th2}^* \sqrt{J_{el}^{th}} \right]^2 \quad (20)$$

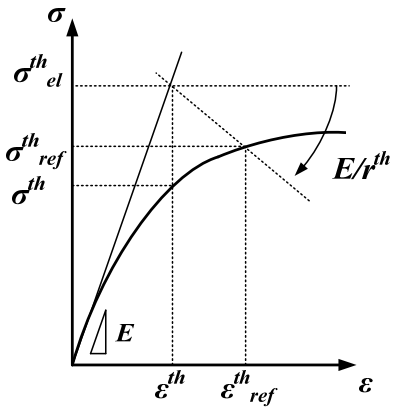


Fig. 3 Concept of k_{th2} option in RCC-MR A16 code

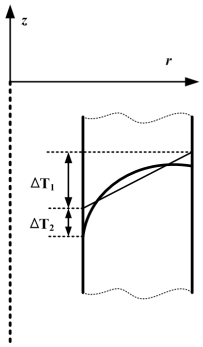


Fig. 4 Thermal load definition in RCC-MR A16

위 식에서 J^{me} 값은 MLL option 혹은 EPS option 에 의해 정의된 J-적분을 나타내며, J_{el}^{th} 값은 2 차 하중하에서 선형 탄성 재료에서의 J-적분 값을 의미한다. k_{th2}^{*}계수는 k_{th2} 계수에 추가적인 계수를 계산하여 나타내는 계수로 3.3.1 절에서 k_{th2}^{*}계수에 대한 내용을 확인할 수 있다.

3.3.1 k_{th2}^{*} option

RCC-MR A16 코드에서는 1,2 차 복합 하중하에서 2 차 응력 재분배 효과를 고려하기 위한 계수로 k_{th2} 값에 추가적인 계수를 계산한 k_{th2}^{*}option 을 제시하고 있으며 아래 식 (21)과 같다.

$$k_{th2}^{*} = \beta_2 + \kappa_1 \cdot (k_{th2} - 1) \tag{21}$$

κ_1 계수는 1 차 하중과 2 차 하중의 상호작용을 나타내는 계수로 식 (22)와 같이 제시되어 있고 β_2 는 보수성을 부여한 계수로 각 형상 별로 다른 값을 제시하고 있다.

$$\kappa_1 = \frac{\sigma_{el}^{th}}{\sigma_{el}^{th} + \sigma_{ref}^{me}} \tag{22}$$

위와 같은 과정에서 정의된 k_{th2}^{*}계수를 식 (20)에 적용하여 1,2 차 복합 하중하에서 J-적분을 계산하였다.

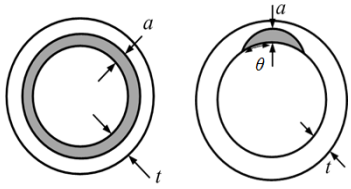


Fig. 5 Geometry of circumferential crack

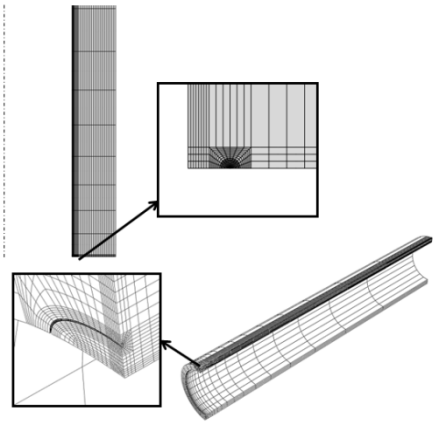


Fig. 6 FE meshes for circumferential cracked pipe

4. 유한요소 해석

본 장에서는 R6 코드와 RCC-MR 코드 간의 정량적인 비교를 위한 유한요소 해석 조건을 기술하였다. 균열 형상 조건 및 하중 조건 그리고 하중 작용 순서에 따른 효과에 대해 분석하여 각 코드가 제시하는 J-적분 예측값과 유한요소 해석 결과 계산되는 J-적분 값을 비교하였다. 본 논문은 균열 형상에 따른 1,2 차 복합 하중하에서 J-적분 계산법의 영향을 확인하기 위해 원주방향 360° 균열(θ/π=1)과 원주 방향 반타원 균열(θ/π=0.1)을 고려하여 비교하였다. Fig. 5 는 앞서 언급한 원주방향 360° 균열 및 원주 방향 반타원 균열배관에 대한 단면도를 나타내며 균열 깊이로는 a/t=0.3 을 고려하였다. 배관의 두께는 10mm 로 고려하였으며, 배관의 평균 반지름은 100mm 로 고려하였다.

본 논문에서는 1 차 하중은 축 방향 인장 하중만을 고려하였으며, 2 차 하중은 RCC-MR A16 코드의 적용 제한성으로 인하여 배관 원주 방향 온도구배만을 고려하였으며, 2 차 하중 크기에 따른 효과를 보기 위해 70℃와 300℃의 온도구배를 고려하였다.

재료 물성의 경우 식 (23)과 같이 Ramberg-Osgood 식을 통해 표현하였으며, 0.2% offset 항복강도는 300MPa 탄성계수는 200GPa 를 사용 하였으며 가공 경화지수인 n=5 를 고려하였다. 또한 열 팽창계수는 1.46×10^{-5}/℃을 고려하였다.

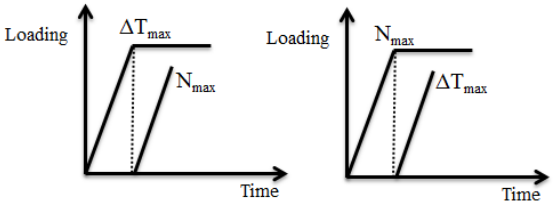


Fig. 7 Categorization of load order type

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_y/E}=\frac{\sigma}{\sigma_y}+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n,\quad \alpha=\frac{0.002E}{\sigma_y} \qquad (23)$$

유한요소 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS v6.11 을 사용 하였으며, 균열 형상에 따라 2 차원 요소 혹은 3 차원 요소를 사용 하였으며, 균열 끝단에는 쐐기 메쉬를 사용 하였다. 또한 해석 시간의 단축을 위해 원주 방향 360° 균열의 경우 축방향 대칭 모델을 사용하여 CAX8R 요소를 사용하였으며, 원주 방향 반타원 균열의 경우 1/4 모델을 사용하여 C3D20R 요소를 사용하였다. Fig. 6 은 본 논문에서 고려한 배관에 대한 유한요소 망이다. 하중 작용 순서는 Fig 7 과 같이 2 차 하중을 먼저 작용하고 1 차 하중을 작용하는 방법과 1 차 하중을 먼저작용하고 2 차 하중을 작용하는 방법으로 나눠 분석 하였다.

5. J-적분 계산 비교

본 장에서는 앞서 선정한 분석 모델에 비교 분석 모델을 토대로 R6 와 RCC-MR A16 코드, 유한요소해석 결과간의 J-적분 예측값을 비교하여 균열 형상, 1 차 및 2 차 하중의 크기에 대한 영향을 확인 하였고 각 코드 별 과도한 보수성 갖거나 혹은 정확성을 갖지 못하는 경우에 대한 J-적분 예측값을 보완 할 수 있는 방법을 제시하였다. Fig 8~10 을 통해 비교 결과를 제시하였다. 각각의 그래프에서 R6 코드 계산결과는 2 개의 선으로 나타내었고 RCC-MR A16 코드에서 계산결과는 2 개의 선과 심벌로 나타내었으며, 유한요소 해석은 2 종류의 심벌로 나타내었다.

5.1 J-적분 계산 결과 비교 분석

5.1.1 원주방향 360° 균열 결과

Fig. 8 은 원주 방향 360° 균열에 대한 J-적분을 비교한 결과이다. Fig. 8 의 그래프에서 2 차 하중의 크기가 70℃와 300℃인 분석 모델을 비교 해보면 균열의 형상에 관계 없이 2 차 하중의 크기가 70℃인 모델의 경우 R6 코드와 RCC-MR A16 코드의 경우 모두 2 차 하중의 크기가 300℃인 분석모델에 비해 정확히 J-적분 값을 예측하는 것을 확인 할 수 있다. 상대적으로 작은 2 차 하중으로 인해 2 차 응력에 의한 응력 재분배 효과가 작은 것을 확인 할 수 있다. 2 차 하중이 300℃인 분석 모델의 경우에는 2 차 하중이 작은 경우보다 보수성이 큰 평가를 하지만 RCC-MR A16 코드에 비해 R6 코드의 경우 초반부에 보수성이 적은 J-적분 평가하고 L_r 이 커질수록 보수성이 큰 평가를 하고 있다. 이는 상대적으로 1 차 하중에 대한 J-적분 평가에 있어 RCC-MR A16 이 더 정확한 평가를 한다는 것을 알 수 있다. 기계 하중이 작은 영역에서는 R6 코드가 보수성이 작은 평가를 하며, 기계하중이 큰 영역에서는 RCC-MR A16 이 보수성이 작은 평가를 하는 것으로 나타났다. 원주방향 360℃ 균열의 경우 하중 작용 순서에 따른 2 가지의 유한요소 해석 결과보다 보수적인 평가를 하고 있다.

R6 코드에서 제시하는 단순계산법의 경우 다른 평가법과 달리 보수성이 큰 평가를 한다. 단순계산법은 L_r 과 β_1 값만 알면 V-계수의 평가가 가능한 방법이라 제일 간단하게 계산할 수 있는 반면 가장 보수적인 평가 결과를 보인다. 2 차 하중의 크기가 300℃인 분석 모델의 경우 R6 코드 평가결과에서 기계하중이 L_r=1 부근에서 다른 결과와 달리 급격히 기울기가 변하는 평가를 한다. R6 코드에서 V-계수를 평가하는 과정에서 탄성 추종 현상으로 인해 보수적인 평가를 하여 이와 같은 결과를 보이게 된다. RCC-MR A16 코드의 경우 앞서 언급한 것과 같이 기계하중이 작은 영역에서 보수성 계수인 β_2 로 인하여 과도한 보수성을 보이고 있지만, 기계하중이 큰 영역에서는 보수성이 작은 평가를 하는 것을 확인 할 수 있다. RCC-MR A16 코드의 계산 결과로 사용된 두 가지 평가방법은 기계하중에 대한 평가법에 의해 구분된다. 두 가지 평가방법 모두 기계하중이 작은 영역에서는 보수성이 작은 평가를 하지만 기계하중이 커질수록 평가 결과간의 차이가 커지는 것을 확인 할 수 있다.

5.1.2 원주방향 반타원 균열 결과

Fig. 9 는 원주방향 반타원 균열에 대한 비교 결과이다. 원주 방향 360° 균열과 마찬가지로 2 차 하중의 크기가 70℃인 분석 모델이 2 차 하중의 크기가 300℃인 분석 모델에 비해 2 차응력에 의한 효과가 적어 보수성이 작은 평가를 하고 있다.

2 차 하중의 크기가 300℃인 분석 모델의 경우 원주 방향 360° 균열과 마찬가지로 RCC-MR A16 코드의 경우 기계하중이 작은 부분에서 보수성을 갖는 평가 결과를 보였지만 기계하중이 큰 부근에서는 R6 코드에 비해 보수성이 작은 평가를 하였다. R6 코드의 경우 70 ℃ 분석모델에서 기계하중이 큰 영역에서의 평가값이 유한요소 해석값에 비해 낮은 J-적분을 예측하였다. 이는 2 차 하중의 크기가 70℃인 분석 모델에서는 2 차 하중에 의한 응력 완화 효과가 크게 발생하지 않으므로 1 차 하중에 대한 평가가 적절히 이루어 지지 않은 결과임을 알 수 있다. 원주 방향 360° 균열이 있는 배관과 마찬가지로 원주 방향 반타원 균열이 있는 배관도 R6 코드에서 제시하는 단순계산법의 경우 2 차 하중의 크기가 큰 경우 과도한 보수성을 갖는 평가를 한다. 또한 원주 방향 360° 균열이 있는 배관과 비교하여 같은 온도의 2 차 하중이 작용할 때 R6 코드에서 제시하는 열 하중과 기계 하중 간의 매개변수인 β_1 값이 작아서 2 차 하중의 영향이 적게 받는 평가를 한다. RCC-MR A16 코드의 경우 복합 하중하에서 J-적분 평가값의 경향은 원주 방향 360° 균열 모델의 경우와 같으나, 같은 온도에서의 2 차 하중의 크기가 원주 방향 360° 균열 모델에 비해 작아서 2 차 하중의 영향을 적게 받는 평가를 하고 있다.

R6, RCC-MR A16 코드의 두 가지 평가 방법 모두 특정 분석 모델에서는 하중 작용순서에 따라 유한요소해석 결과에 비해 비보수적인 J-적분 평가를 하는 것으로 확인 되었다. 각 코드에서는 하중 작용순서에 따른 영향을 고려 하지 않고 같은 J-적분값을 평가하고 있으나, 실제 유한요소해석 결과는 하중 작용순서에 따라 다른 J-적분값을 평가하고 있어 각 코드에 따라 J-적분을 평가할 시에 하중 작용 순서에 따른 영향에 대한 보완을 필요로 하고 있다.

5.2 각 코드 별 계산 보완 방법

5.1 절에서 언급한 바와 같이 각 코드에서는 과도한 보수성의 J-적분을 평가하는 구간을 가지고 있다. 본 절에서는 이러한 과도한 보수성의 계산 결과를 나타내는 코드 계산법에 대한 보완방법에 대해 기술 하였다.

5.2.1 R6 코드 계산 보정법

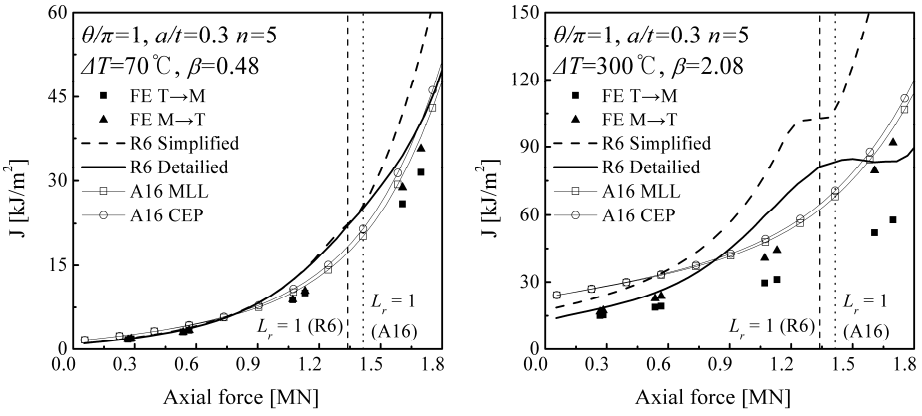
R6 코드의 경우 기계하중이 작은 초반부의 경우 보수성이 작은 평가를 하였지만, 기계하중이 큰 영역에서는 과도한 보수성을 가지고 있거나 혹은 유한요소해석 값보다 더 작은 J-적분을 평가하는 것을 확인 할 수 있었다. R6 코드의 경우 RCC-MR A16 코드와 달리 각 균열 형상 별로 보수적인 한계하중법을 제시하고 있기 때문에 이러한 결과를 보인다. 따라서 김윤재[8] 등에 의해 연구된 최적화된 참조하중을 적용하면 R6 평가법을 보완할 수 있다. 최적화된 참조 하중을 나타내면 식 (24)와 같다.

$$N_{OR} = \gamma\left(2\pi r t \sigma_y\right)\left[1-\frac{\theta\frac{a}{t}+2\sin^{-1}\left(\frac{a}{t}\frac{\sin\theta}{2}\right)}{\pi}\right] \tag{24}$$

여기서 γ 는 소성한계하중에 대한 보정계수를 나타내며 유한요소해석을 통해 각각의 균열 형상별 계수를 구하였다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 새로운 한계하중법을 이용해 구한 J-적분값과 기존의 R6 코드에 제시된 한계하중법을 이용해 구한 계산 결과를 비교한 그래프이다. 각 그래프에서 기존의 계산 결과와 비교하여 과도한 보수성을 보였던 분석 모델의 경우 새롭게 제시된 계산법을 이용한 결과 보수성이 줄어든 평가를 하였다. 또한 원주 방향 반타원 균열이 있는 분석모델에서 유한요소해석에 비해 비보수적인 J-적분 평가를 하였던 분석 모델의 경우 새롭게 제시된 계산법을 이용한 결과 비보수성을 갖지 않는 평가를 하였다. 이와 같이 R6 코드에서 제시하는 한계하중법에 비해 최적화된 참조하중법을 사용하면 보다 보완된 평가를 할 수 있다.

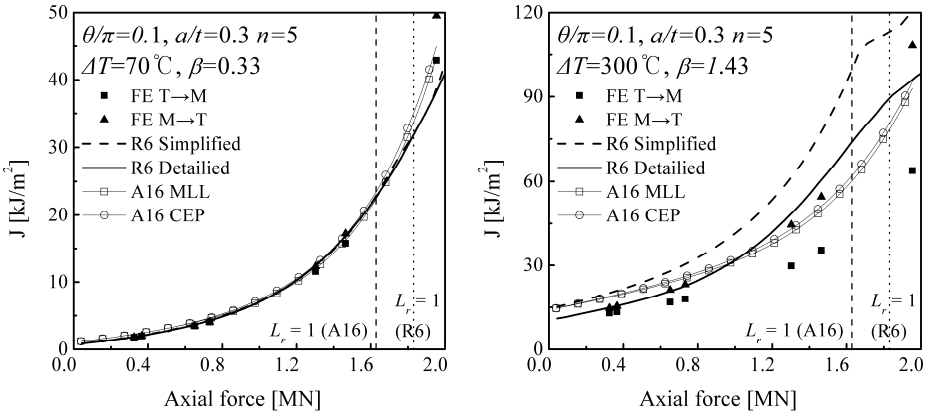
5.2.2 RCC-MR A16 코드 계산 보정법

RCC-MR A16 코드의 경우 식 (21)에서 언급한 보수성 관련 계수인 β_2 계수에 대한 보완을 통해서 기계하중이 작은 영역에서의 보수성을 줄 일 수 있다. β_2 계수는 각 균열 형상 별로 축 방향 인장하중만 작용하는 경우 원주 방향 360° 균열의 경우 1.3, 원주 방향 반타원 균열의 경우 1.2 로 제시하고 있다. 본 논문에서는 A16 코드에서 2 차 하중만이 존재 하는 경우에 제시하고 있는 k_{th2} 계수와 1,2 차 하중이 복합적으로 작용할 시에 제시하고 있는 k_{th2}^*계수가 1 차 하중이 거의 작용하지 않는 구간에서 유사한 평가를 하여 1 차 하중이 작은 구간에서 보수성을 줄이기 위해 β_2 계수를 1 로 보완 하여 제시하였다. 새롭게 제시된 β_2 계수를 이용해 J-적분을 평가하여 Fig. 12 에 제시하였다. 2 차 하중의 크기가 70℃인 분석 모델의 경우에는 작은 2 차 하중으로 인해 초반부에 보수성을 보이지 않아 분석하지 않고 2 차 하중의 크기가 300℃



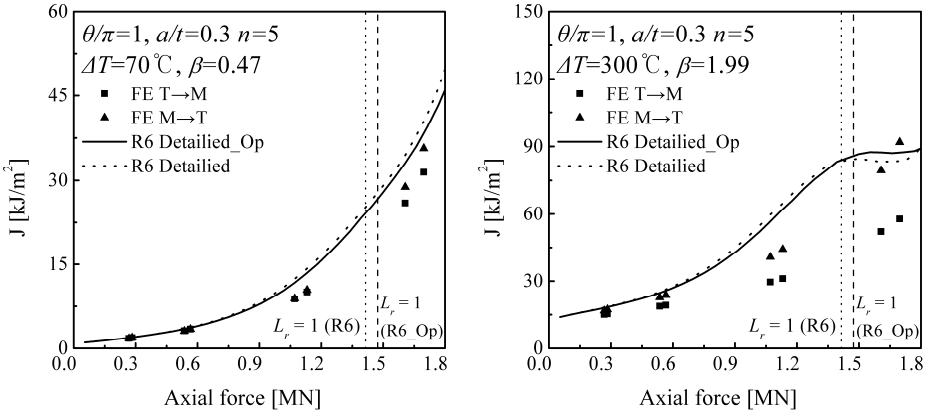
(a) (b)

Fig. 8 Comparison of *J*-integral with R6, RCC-MR A16 and FE result θ/π=1, a/t=0.3, n=5; (a) ΔT=70℃ (β_I=0.48), (b) ΔT=300℃ (β_I=2.08)



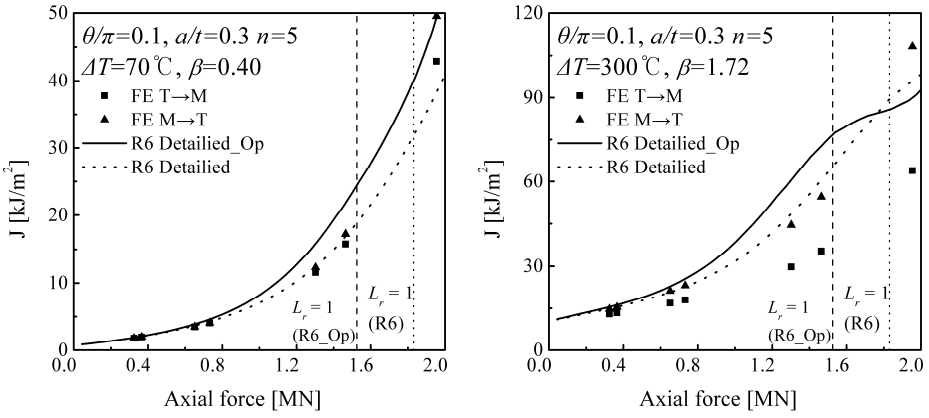
(a) (b)

Fig. 9 Comparison of *J*-integral with R6, RCC-MR A16 and FE result θ/π=0.1, a/t=0.3, n=5; (a) ΔT=70℃ (β_I=0.33), (b) ΔT=300℃ (β_I=1.43)



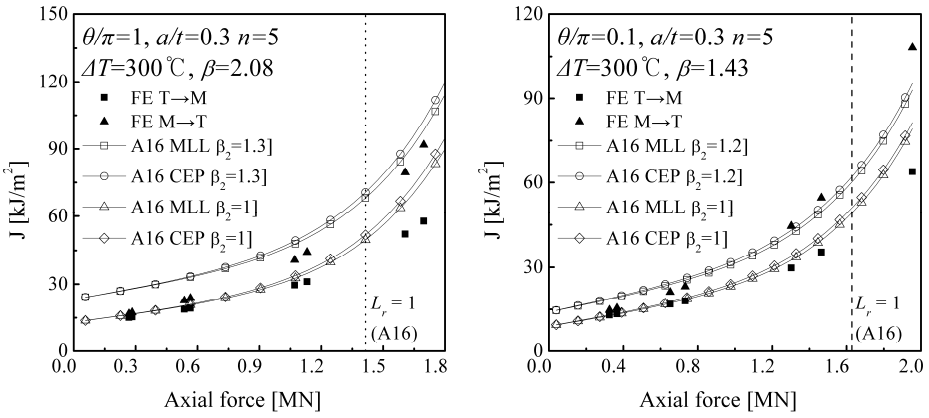
(a) (b)

Fig. 10 Comparison of *J*-integral with optimization limit load and R6 limit load θ/π=1, a/t=0.3, n=5; (a) ΔT=70℃ (β_I=0.47), (b) ΔT=300℃ (β_I=1.99)



(a) (b)

Fig. 11 Comparison of *J*-integral with optimization limit load and R6 limit load θ/π=0.1, a/t=0.3, n=5; (a) ΔT=70℃ (β_1=0.40), (b) ΔT=300℃ (β_1=1.72)



(a) (b)

Fig. 12 Comparison of *J*-integral with modification β_2 factor θ/π=1, a/t=0.3, n=5; θ/π=0.1, a/t=0.3, n=5 ; (a) ΔT=300℃ (β_1=2.08), (b) ΔT=300℃ (β_1=1.43)

인 분석 모델만 β_2 계수를 보완하여 비교하였다. 보수성 계수를 보완한 평가 결과를 분석해보면 기계하중이 작을 때의 J-적분 계산 결과가 과도한 보수성을 보이지 않는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 Fig. 12 에서 확인할 수 있다. 그러나 보수성 계수를 1 로 보완 후 계산하면 하중 작용 순서에 따른 영향으로 인한 유한요소해석 결과를 모두 만족 시키지 못하는 결과가 도출 되었다. 1 차 하중이 먼저 작용하는 경우에 있어 보수적인 계산을 하지 못하여 만약 과도한 보수성을 제거 하기 위해 보수성 계수를 보정할 시에는 배관 시스템에 작용하는 하중 순서에 따른 정확한 판단을 필요로 하고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 원주 방향 균열이 있는 배관에 1,2 차 복합 하중이 동시에 작용 할 시에 1 차 응력에 의한 2 차 응력 재분배 효과를 반영한 R6, RCC-MR A16 코드의 J-적분 계산법에 대한 정량적인 비교를 하였고, 각 코드에서 제시하는 방법이 과도한 보수성을 갖거나 혹은 유한요소 해석보다 작은 J-적분을 평가하는 경우 J-적분 계산의 보완할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 논문에서의 결과는 원주방향 균열이 있는 배관에 대한 J-적분 평가 시 적용 가능할 것으로 사료된다. 본 논문의 연구 결과는 다음과 같다.

(1) R6 코드의 경우 1,2 차 복합 하중하에서 기계하중이 작은 영역에서는 비교적 정확한 J-적분 평가를 하고 있으나, 복합 하중에 의한 응력 재분배 효과보다 1 차 하중에 의한 J-적분 평가법에 의해 지배적인 평가가 이루어지는 L_r=1 부근에서는 과도한 보수성을 갖는 평가를 하고 있다.

(2) RCC-MR A16 코드의 경우 각 균열 형상에 따라 1 차 하중뿐만 아니라 복합 하중하에서의 J-적분 계산법을 제시하고 있어 L_r=1 부근에서 보수성이 작은 결과를 보이고 있으나, 기계하중이 작은 영역에서는 보수성 계수로 인하여 과도한 보수성을 갖는 평가를 하고 있다.

(3) R6 코드의 경우 보수성이 큰 한계하중법을 제시하고 있다. 따라서 L_r =1 부근에서의 J-적분 예측값에 대한 보수성을 줄이기 위해선 최적화된 참조 하중을 사용해야 하며 최적화된 참조 하중을 사용하면 기존의 방법보다 보수성이 적은 평가를 할 수 있다.

(4) RCC-MR A16 코드의 평가 방법을 이용해 구한 J-적분 예측값을 분석해 보면 초반부의 매우 보수적인 결과를 예측을 하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경우 각 형상 별로 제시되고 있는 보수성 계수인 β_2 계수에 대한 보완을 통해서 초반부의 과도한 보수성에 대한 보정을 할 수 있으나 이러한 보정의 결과로 하중 작용순서에 따른 유한요소 해석 결과를 만족시키지 못할 수 있다. 따라서 과도한 보수성을 보정하기 위해 보수성 계수를 보완할 시에는 실제 평가가 이루어지는 배관 혹은 압력용기에 작용하는 하중 순서에 따른 정확한 판단을 필요로 하고 있다.

(5) R6, RCC-MR A16 코드의 다수의 분석 모델에서 2 차 하중이 먼저 작용하는 경우에 대한 평가는 보수성을 보이고 있지만, 2 차 하중에 의한 응력완화가 적게 발생하는 경우인 1 차 하중이 먼저 작용하고 2 차 하중이 작용하는 경우에 대한 평가는 보수적이지 못한 경우가 있다. 따라서 이러한 균열 평가 코드를 사용해 균열을 평가할 시에 사고 사례 유형 혹은 운전 조건에 맞는 J-적분 계산법을 사용해야 할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 원주방향 균열이 있는 배관에 대한 유한요소 해석과 코드간의 비교를 통해 각 국가 별로 제시하는 균열 평가 코드에 대한 정량적인 비교를 하였고 이를 통해 각 국의 원자력 발전소 설비 및 플랜트 산업에 대한 설계 및 운용에 있어 상이한 평가가 나타날 경우 각 코드 별로 J-적분을 보완할 수 있는 방법을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No.2012MB2A9A02029354),(No.2012M2A7A1051939)

참고문헌

(1) Ainsworth, R. A., 1986,"The Treatment of Thermal and Residual Stresses in Fracture Assessments," *Eng Fracture Mechanics*, Vol. 24, pp. 65~76.

(2) Ainsworth, R. A., 1984, "The assessment of defects in Structures of Strain Hardening Material," *Eng Fracture Mechanics*, Vol. 19, pp. 633~642.

(3) Song, T. K, Kim, Y. J, Nikbin, K. and Ainsworth, R. A., 2009, "Approximate J Estimates for Circumferential Cracked Pipes Under Primary and Secondary Stresses," *Eng Fracture Mechanics*, Vol. 76, pp. 2109~2125.

(4) Oh, C. Y, Kim, Y. J, Budden, P. and Ainsworth, R. A., 2011, "Biaxial Stress Effects on Estimating J Under Combined Mechanical and Thermal Stresses," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 88, pp. 365~374.

(5) 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," *Eng Fracture Mechanics*, Vol. 74, pp. 2864~2880.

(6) R6, 2009, "Revision 4 : Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," Britisih Energy Generation Ltd., Gloucester, UK.

(7) RCC-MR, 2010 edition, "Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands and High Temperature applications," Appendix A16,Tome I, Vol. Z, Paris, AFCEN, Paris.

(8) Kim, Y. J., Shim, D. J., Nikbin K., Kim, Y. J., Hwang, S. S. and Kim, J. S., 2003, "Finite Element Based Plastic Limit Loads for Cylinders with Part-tTrough Surface Cracks Under Combined Loading," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 80, pp. 527~540.