2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원자로 압력용기 운전제한곡선 작성 : 가열곡선

P-T Limit Curve Construction for the Reactor Pressure Vessel : Heatup Curve

장 창희, 문 호림, 정 일석, 김 태룡

한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요약

원전의 기동 및 정지시에는 조사취화로 인해 파괴인성이 저하된 원자로 압력용기의 취성파괴를 방지하기 위해 운전제한곡선(P-T Limit Curve) 이하에서 운전되어야 한다. 운전제한곡선은 ASME Sec. XI, App. G 에 제시된 방법에 따라 작성되고 있으나 이러한 방법이 일부 원전의 경우 과도하게 보수적이라는 인식이 제기되었다. 이에 따라 ASME 에서는 App. G 의 방법대신 Code Case 에 제시된 다른 방법에 의해서도 운전제한곡선이 작성될 수 있음을 허용하고 있다. 이 논문에서는 가열운전 조건에 대한 App. G 운전제한곡선 작성 방법을 검토하고 조사취화가 심한 원주방향 용접부를 가지는 원자로 압력용기를 대상으로 여러가지 Code Case 의 적용에 따른 영향을 평가하였다. 그 결과 가열운전에 대한 운전제한곡선 작성시 일정 가열율 조건에 있는 내부균열이 추가로 고려되어야 할 것으로 평가되었으며 Code Case 적용시 원주방향 용접부 뿐만 아니라 파괴인성이 큰 모재도 같이 고려하여야 할 것으로 확인되었다. Code Case 적용에 따라 가열운전시의 운전허용영역이 크게 증가하였다.

ABSTRACT

During the startup and shutdown processes of the nuclear power plants, pressure and temeperature are to be maintained below the P-T Limit Curve to prevent the non-ductile failure of the reactor pressure vessel. The ASME Sec. XI App. G describes the detailed procedure for constructing the P-T Limit Curve. Recently, several Code Cases as well as more accurate alternative methods were introduced to reduce the excess conservatism in App. G procedure. In this paper, for the startup, or heatup condition, the App. G procedure are reviewed. Then, the effects of the Code Cases on the P-T Limit Curves of the highly embrittled reactor pressure vessel are assessed. The results show that the current App. G procedure should be modified to consider the inner surface flaw under constant heatup rate when constructing the P-T Limit Curve for heatup condition. Also, when the Code Case N-588 is applied, the axial flaw in the less embrittled base metal has significant effect on the P-T Limit Curve in lower temperature range. Overall, the incorporation of the Code Cases greatly widens the allowable operating region during the heatup process.

1. 서 론

원자로 압력용기는 원자력발전소의 계통, 구조물 및 기기 가운데 안전성 측면에서 가장 중요한 기능을 담당하고 있으며 내부에 핵연료 집합체와 핵연료를 지지하고 있다. 또한 정상 가동시에는 핵분열로 인한 고온, 고압의 냉각수를 유지하는 구조물로 안전상 가장 중요하므로 엄격한 법규 및 기준에 따라 설계, 제작되고 있으며 이에 대한 건전성 확보를 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

원자로 압력용기는 가동 중 중성자에 조사되어 재료의 강도와 경도가 증가하고 연성 및 인성이 감소

하는 조사취화 현상이 발생한다. 따라서 운전 중 빈번하게 발생하는 기동/정지시에는 원자로 압력용기의 취성파괴가 발생하지 않도록 압력과 온도의 한계를 결정하여 이에 따라 운전하여야 한다[1]. 원자로 압력용기의 조사취화는 발전소의 수명을 단축시키는 재료열화의 주요 원인으로 작용하게 되며 이로 인해 운전제한곡선상의 안전운전영역이 감소하기 때문에, 수명말기에 도달하는 원자력발전소의 수명연장을 위해서는 운전제한곡선의 정확한 평가가 필수적이다.

현재 가압경수형 원자로 압력용기의 경우, ASME Code Sec. XI, App. G[2]에 준하여 운전제한곡선을 작성하고 이에 따라 운전하는 것이 일반적이다. 이를 위해 EPRI 에서는 P-T calculator[3]를 개발하여 사용하고 있으며 Westinghouse 에서도 독자적인 프로그램을 사용하여 운전제한곡선 작성에 사용하고 있다. 국내에서는 운전제한곡선 작성용으로 RVIES 코드[4]가 개발되기도 하였으며 확률론적 파괴해석 코드인 VINTIN 코드[5]를 이용하여 냉각운전시 운전제한곡선에 미치는 변수들의 영향[6] 및 Code Case 의 영향을 평가하기도 하였다[7].

그러나 App. G에 수록된 운전제한곡선의 작성 절차에는 여러가지 보수적인 가정들이 적용되어 안전운전 영역이 필요 이상으로 감소되는 문제점을 안고 있다. 이에 따라 ASME 에서는 타당한 근거가 있는 경우 코드에서 제시하는 보수적인 방법 대신 보다 현실적인 방법을 사용하여 운전제한곡선을 작성할 수 있는 Code Case 를 제정하였으며 많은 원전에서 이를 적용한 운전제한곡선을 작성하여 USNRC 의 승인을 받았다. 본 논문에서는 국내에서 가장 오래된 고리 1 호기 원자로 압력용기의 재료물성과 기하학적 형상에 대하여 냉각운전에 대한 운전제한곡선 작성에 사용된 방법론을 사용하여 App. G 절차 및 방법을 검토하고 각 Code Case 를 적용한 운전제한곡선을 작성하여 그 영향을 분석하였다. 또한 각각의 Code Case 를 고려한 운전제한곡선 작성을 위한 절차를 제시하였다.

2. ASME Sec. XI App. G 및 Code Cases 의 내용

2.1 ASME Sec. XI App. G[2]

ASME Code Sec. XI, App. G 에서는 가상결함이 존재하는 원자로 압력용기의 가열 및 냉각 운전시 내압과 열응력에 의한 응력확대계수의 합이 원자로 압력용기 재료의 기준파괴인성치, K_{Ia}보다 작도록 압력과 온도의 한계를 설정하여 이에 따라 운전하도록 규정하고 있다. 운전제한곡선과 관계된 규정은 선형탄성 파괴역학에 기초를 둔 해석 절차로서 파괴방지 조건은 다음과 같다.

$$2K_{Im} + K_{It} < K_{IR} \quad (\text{unit}: \text{ksi}\sqrt{\text{in}}) \tag{1}$$

여기서 K_{Im} 과 K_{It}는 각각 압력에 의한 막응력과 열응력에 의한 응력확대계수이고 K_{IR} 은 재료의 파괴인성치로 K_{Ia} 이다. 또한 K_{Im} 에 2 를 곱한 것은 막응력에 대하여 안전여유를 고려한 것이다.

원자로 압력용기의 무연성 천이기준온도(Reference Temperature-Nil-Ductility Transition : RT_{NDT}) 및 균열선단의 온도(unit : F)로부터 재료의 파괴인성치를 다음식을 이용해 구할 수 있다.

$$K_{Ia} = 26.78 + 1.223 \exp [0.0145 (T - RT_{NDT} + 160)] \tag{2}$$

가열운전 중 적용되는 운전제한곡선은 다음 3 가지 방법으로 계산된 허용압력의 하한치로 결정된다.

2.1.1 정상상태의 내벽 축방향균열 (SS for inner flaw)

정상상태(HR = 0, or K_{It} = 0)에서 원자로 압력용기 내벽의 가상 축방향균열(형상계수 = 1/6, 깊이 = 1/4T)에 대한 허용압력은 위 식 (1)로부터 아래와 같이 계산된다.

$$2K_{Im} < K_{IR} \tag{3}$$

이 경우 균열선단에서의 온도는 냉각재온도와 동일하며 막응력에 의한 응력확대계수는 다음과 같이 주어진다.

$$K_{Im} = M_m \cdot (p \cdot R_i / t)$$

$$\text{where } M_m = 1.85 \quad \text{for } \sqrt{t} < 2$$
$$M_m = 0.926\sqrt{t} \quad \text{for } 2 \le \sqrt{t} \le 3.464 \qquad (4)$$
$$M_m = 3.21 \quad \text{for } 3.464 < \sqrt{t}$$

여기서 p = internal pressure (ksi)
R_i = vessel inner radius (in)
t = vessel thickness (in)

따라서 위의 식 (4)로부터 허용압력 P를 구할 수 있다.

2.1.2 정상상태의 외벽 축방향균열(SS for outer flaw)

정상상태(HR = 0, or K_{It} = 0)에서 원자로 압력용기 외벽의 가상 축방향균열(형상계수 = 1/6, 깊이 = 1/4T)에 대한 허용압력은 위 식 (1)로부터 아래와 같이 계산된다.

$$2K_{Im} < K_{IR} \qquad (5)$$

이 경우 균열선단에서의 온도는 냉각재온도와 동일하며 막응력에 의한 응력확대계수는 다음과 같이 주어진다.

$$K_{Im} = M_m \cdot (p \cdot R_i / t)$$

$$\text{where } M_m = 1.77 \quad \text{for } \sqrt{t} < 2$$
$$M_m = 0.893\sqrt{t} \quad \text{for } 2 \le \sqrt{t} \le 3.464 \qquad (6)$$
$$M_m = 3.09 \quad \text{for } 3.464 < \sqrt{t}$$

따라서 위의 식 (6)로부터 허용압력 P를 구할 수 있다.

2.1.3 일정 가열율조건의 외벽 축방향균열(HR for outer flaw)

원자로 가열운전 중 원자로 압력용기 벽두께 방향으로의 온도구배로 인해 원자로 압력용기 외벽의 가상 축방향균열(형상계수 = 1/6, 깊이 = 1/4T) 선단에 작용하는 최대 응력확대계수 K_{It} 는 다음과 같이 주어진다.

$$K_{It} = 0.753 \times 10^{-3} \cdot HU \cdot t^{2.5} \qquad (7)$$
$$\text{where } HU = \text{heatup rate (F/hr)}$$

원자로 압력용기 외부 균열선단에서의 온도는 App. G의 그림 G-2214-1 및 G-2214-2로부터 구할수 있다. 위의 식 (1)과 (7)을 이용하여 최대허용 막응력에 의한 응력확대계수 K_{Im} 을 구할 수 있으며 위의 식 (6)으로부터 허용압력 P를 구할 수 있다. 따라서 가열운전 동안의 운전제한곡선은 위의 세가지 경우에 대한 허용압력의 하한치로 결정된다.

위와 같이 App. G 절차에 의해 생성된 운전제한 곡선은 여러 가지 측면에서 매우 보수적이며 그 중 중요한 것으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 원자로 압력용기 재료의 기준파괴인성 곡선으로 동적파괴인성 혹은 균열정지파괴인성의 하한치를 나타내는 K_{Ia} 곡선을 사용하고 있으나 실제 가열/냉각 운전은 매우 느린 과정으로 정적파괴인성 특성인 K_{IC}를 적용하는 것이 보다 현실적임.

- 가상균열의 방향을 최대응력이 작용하는 방향에 축방향균열을 가정하여 Limiting Material이 원주방향 용접부인 경우 과도하게 보수적인 해석이 수행됨.

- $T\text{-}RT_{NDT}$의 함수로 표현되는 K_{Ia} 혹은 K_{IC} 곡선은 1970년대초 제한된 데이터베이스를 이용하여 단순히 하한치를 택하여 결정된 것으로 그 동안 보다 기술적으로 진보된 통계적인 의미를 가지는 master curve 방법이 정립됨에 따라 실제 재료의 파괴인성치에 비해 매우 보수적임이 밝혀지고 있음.

이와 같은 과도한 보수성이 널리 인식됨에 따라 아래와 같은 Code Case 들이 제정되어 보다 실제적인 운전제한곡선 평가가 이루어지고 있다.

2.2 Code Case N-588 [8]

ASME Sec. XI, Code Case N-588 은 App. G paragraph G-2120, 'the postulated defect should be sharp, surface defects oriented normal to the direction of maximum stress' 요건에 대해 원주방향 용접부에서는 원주방향 가상균열을 사용하여 운전제한곡선을 작성할 수 있도록 허용한 것이다. 이는 용접부에 존재하는 균열의 경우 대개 용접 방향과 일치하며 용접부의 폭이 2 인치 정도인데 비해 용접부 폭을 벗어나는 축방향균열이 존재한다고 가정하는 것이 매우 비현실적이라는 인식에 바탕을 두고 있다.

2.3 Code Case N-640 [9]

ASME Sec. XI, Code Case N-640 은 App. G 의 운전제한곡선 작성시 Fig. G-2210-1 의 K_{Ia} 곡선대신 Sec. XI App. A 에 제시된 K_{IC} 곡선을 사용할 수 있도록 한 것이다(아래 식 (8) 참조). 단 이때 LTOP 요건은 운전제한곡선에 의한 허용압력의 100%를 초과하지 않아야 한다.

$$K_{IC} = 33.2 + 2.806 \cdot \exp(0.02(T - RT_{NDT} + 100))$$
$$K_{IA} = 26.7 + 1.223 \cdot \exp(0.0145(T - RT_{NDT} + 160)) \quad (8)$$

3. 해석 조건 및 방법

3.1 해석조건

해석에 사용한 원자로 압력용기는 내경이 132 inch, 벽 두께가 6.5 inch, 그리고 클래드부의 두께가 0.125 inch 인 Westinghouse 2-loop 형으로 모재는 SA508 Class 2 로 이루어져 원주방향 용접부 만 있으며, 모재가 운전환경에 의해 부식되는 것을 방지하기 위한 클래드부는 스테인리스강으로 되어있다. 그러나 운전제한곡선 작성시에는 클래드로 인한 열전달/열전도 특성변화만을 고려하고 클래드의 재료물성치 등은 고려하지 않는다. 모재부의 재료물성치는 Table 1 과 같다[10].

조사취화에 가장 취약한 원자로 압력용기 부위는 구리 및 니켈함량이 높은 노심대영역의 원주방향 용접부이다[11]. 용접부는 특성상 균열발생의 빈도가 높은 부위로 사고발생시 균열의 진전으로 인한 파단가능성이 가장 높은 부위이다. 해석에 사용된 약 40 년 운전에 해당하는 32EFPY 조건에서의 내벽으로부터 1/4T 지점에서의 용접부 및 모재의 무연성천이기준온도는 각각 288.21°F 및 138.80°F 이며 외벽으로부터 1/4T 지점에서는 248.20°F 및 126.44°F 이다[12].

본 논문에 적용된 가열운전 조건은 원자로용기 내부 냉각재가 초기온도 70°F 에서 운전온도 550°F 까지 60°F/hr 로 일정하게 변하며, 원자로 압력용기 내벽 전체에 걸쳐 냉각재의 압력과 온도가 모두 동일하게 변하는 것으로 가정하였다.

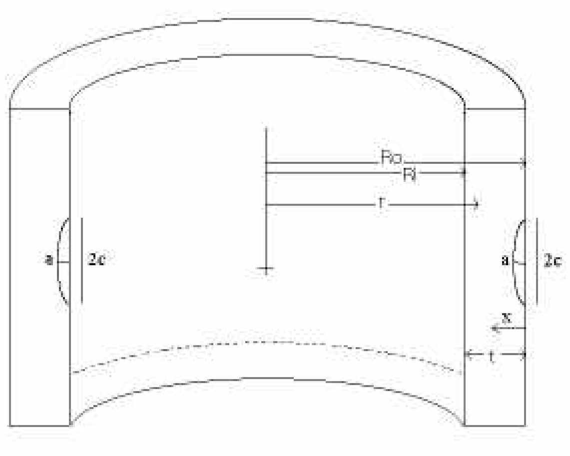
Table 1. Material properties of base metal and weld metal (3/4Ni-1/2Mo-1/3Cr-V)

Parameters	평균값 (70-550)
Modulus of elasticity, $\times 10^6$ (psi)	26.52
Poisson' s ratio	0.3
Thermal conductivity, (Btu/hr-ft-°F)	23.63
Specific heat (Btu/lb-°F)	0.1216
Mean thermal expansion, coefficient$\times 10^{-6}$ (in/in/°F)	7.38
Density (lb/ft^3)	487.53

3.2 운전제한곡선 작성방법

균열은 원자로 압력용기 내벽 및 외벽표면의 형상비 ($a/2c$)가 1/6 인 반타원 형상의 축방향 혹은 원주방향 균열로 가정하였다. Fig. 1 에는 해석에 사용된 축방향균열의 위치를 개략적으로 나타내었다. 가열운전 중 원자로 압력용기 내벽에서의 열전달/열전도 해석, 응력해석, 내벽 균열의 응력확대계수 계산에는 VINTIN 코드를 사용하였으며 이에 대한 설명은 다른 곳에 잘 나타나 있다[5,6]. 외벽의 반타원균열에 대한 응력해석, 응력확대계수 계산은 VINTIN 코드의 방법을 개량하여 사용하였으며 아래에 간략히 설명하였다.

냉각재 온도가 변하는 경우 원자로 압력용기 내부에서의 온도분포는 수치해석적인 방법으로 구하였다. 온도분포가 구해지면 응력해석 및 응력확대계수 계산을 위해 다음과 같이 3-차 방정식으로 근사한다.



a) inner surface crack b) outer surface crack

Fig. 1. Postulated crack

$$T_{base}(r,t) = A_0(t) + A_1(t)\cdot r + A_2(t)\cdot r^2 + A_3(t)\cdot r^3 \quad (9)$$

모재의 온도분포, $T_{base}(r,t)$로부터 발생하는 열응력은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\sigma_\theta \approx \sigma_Z = \sigma_{base}(r,t) = \frac{E_{base}}{1-\nu_{base}}\cdot(T_{ref}(t) - T_{base}(r,t))\cdot \alpha_{base} \quad (10)$$

여기서 E_{base} 는 탄성계수, $T_{ref}(t)$는 force equilibrium 관계식으로부터 구한 기준온도, α_{base}는 선형 열팽창계수, ν_{base}는 포아송비이다. 이러한 방법으로 구한 응력분포, σ_{base}는 온도분포와 외벽으로부터의 거리에 대한 함수로 다음과 같이 3 차 다항식으로 표시된다.

$$\sigma_{base}(x,t) = B_0(t) + B_1(t)\cdot x + B_2(t)\cdot x^2 + B_3(t)\cdot x^3, \quad \text{where } x = \frac{R_o - r}{t} \quad (11)$$

원자로 압력용기와 같은 무한 원통의 내면에 일정한 압력 P 가 가해질 때 원통 내부에 작용하는 응력, σ_P는 아래와 같은 식으로 계산된다.

$$\sigma_\theta(x) = \frac{R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}\cdot P(t)\cdot\left(1 + \frac{R_o^2}{(R_o - A)^2}\right) \approx \frac{R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}\cdot P(t)\cdot(2.00 + 0.1819\cdot x + 0.0243\cdot x^2 + 0.0038\cdot x^3) \quad (12)$$

$$\sigma_z = \frac{R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}\cdot P(t) \quad (13)$$

응력성분이 3 차 다항식의 형태로 주어지는 경우, 반타원균열 선단에서의 응력확대계수 성분은 다음과 같은 기본식에 의해 구할 수 있다.

$$K = \frac{\sum_{n=0}^{3} G_n C_n a^n}{\sqrt{Q}}\sqrt{\pi a W} \quad (14)$$

여기서 G_n은 영향계수(influence coefficient), C_n은 식 (11) - (13)과 같은 3 차 다항식의 계수, Q는 형상계수이며 아래식으로 나타난다.

$$Q = \text{shape factor}, 1 + 1.464\left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad (15)$$

따라서 위의 관계식들을 이용하여 3 차 다항식의 형태로 주어지는 응력성분에 의한 응력확대계수 성분을 균열방향 및 크기에 따라 계산할 수 있다. 영향계수를 구하기 위해 R/t = 10 인 무한원통에 대한 해석결과[13,14,15]를 사용하여 주어진 균열방향, 깊이 및 형상에 대한 영향계수 값을 구해내어 사용한다.

위와 같은 방법으로 열응력에 의해 균열선단에 작용하는 응력확대계수가 구해지면 식 (1)로부터 최대

허용 압력에 의한 응력확대계수, K_{Im} 이 구해진다. 이로부터 최대 허용 압력은 식 (12) - (14) 를 이용하여 구할 수 있다.

운전제한곡선 작성에 사용된 가열율은 일반적으로 많이 사용하고 있는 60°F/hr 를 적용하였으며 아래 4 가지 경우에 대한 허용압력을 평가하였다.

Case 1 : App. G base case (축방향균열, K_{Ia} 기준파괴인성곡선 사용)

Case 2 : Code Case N-640 적용

Case 3 : Code Case N-588 적용

Case 4 : Code Case N-588 & 640 적용

단 가열운전시 허용압력곡선은 냉각운전의 경우와 달리 원자로 압력용기 내부 및 외부 표면균열에 대하여 일정냉각률 조건에서의 허용압력과 정상상태 조건(냉각률 = 0°F/hr) 에서의 허용압력을 구하기 위한 해석을 각각 수행하고 이들 가운데 최소치로 운전제한곡선을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 작성 방법들간의 비교

여기에서는 기본해석조건인 Case 1 에 대해 App. G, P-T Calculator, Westinghouse 방법과 본 논문에서 사용한 방법에 의한 해석 결과를 비교하였다. Fig. 2 에는 온도해석 결과, Fig. 3 에는 열응력에 의한 균열선단에서의 응력확대계수를 비교하였다. Fig. 2 에서 보듯이 본 논문에서 사용한 방법은 1/4T 외부 표면균열선단에서 P-T Calculator 와 동일한 온도를 보이나 App. G 에 비해서는 약 8°F 정도 낮은 값을 보였다. 이는 냉각운전 조건에서의 온도해석 차이 3°F[7]에 비해서는 매우 큰 값으로 균열선단에서의 재료의 파괴인성치를 App. G 방법이 가장 높게 평가할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 3 에는 열응력에 의해 1/4T 외부 표면균열선단에 작용하는 응력확대계수를 비교하였다. 본 해석에 사용한 방법은 App. G 및 P-T Calculator 에 비해 낮게 평가하였다. 특히 App. G 방법에 비해서는 냉각운전의 경우와 마찬가지로 0.5 ksi√in 정도 낮게 평가하였다.

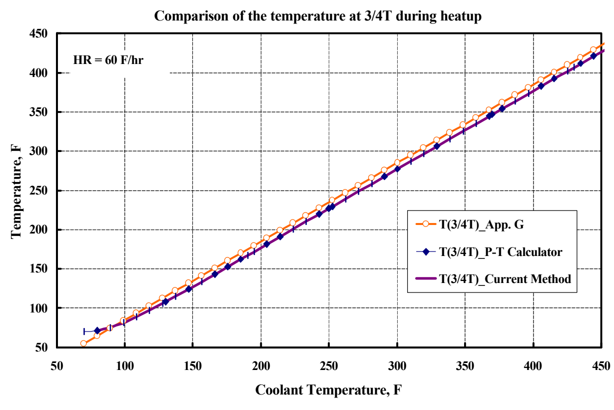


Fig 2. 작성방법에 따른 균열선단에서의 온도분포 비교

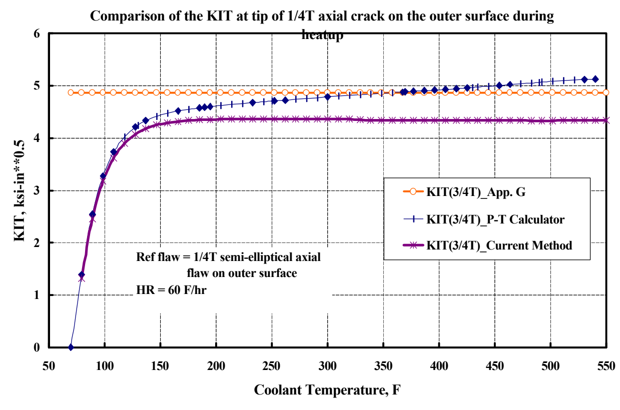
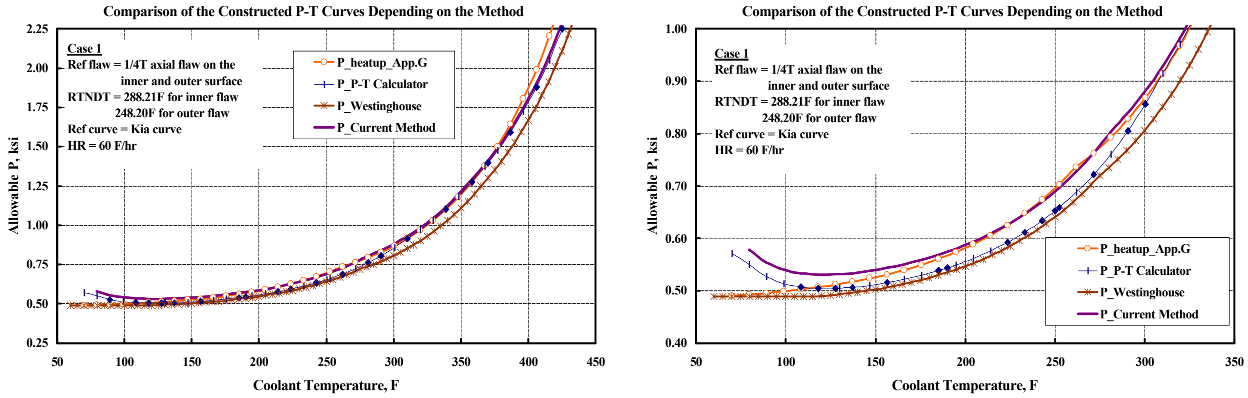


Fig. 3 작성방법에 따른 균열선단에서의 열응력에 의한 응력확대계수 비교

Fig. 4 에는 App. G, , P-T Calculator, Westinghouse, 그리고 본 해석에 사용한 방법에 의한 운전제한곡선을 비교정리하였다. 전체적으로 Westinghouse 방법이 가장 낮은 허용압력을 나타내었으며 본 해석에 사용한 방법은 대부분의 온도영역에서 App. G 및 P-T Calculator 와 30psi 이내에서 일치하는 허용압력을 나타내었다. 이러한 결과를 보면 본 해석에 사용한 방법이 기존의 방법과 유사한 결과를 제시하는 것으로 운전제한곡선 작성에 사용하기에 적절한 것으로 판단할 수 있다.



a) full range b) low temperature range

Fig. 4 작성방법에 따른 운전제한곡선 비교

4.2 운전제한곡선 결정과정 검토

4.2.1 App. G Method

Fig. 5 에는 앞에서 설명한 App. G 방법에 따라 각각 계산된 3 가지 경우의 허용압력곡선과 최종 운전제한곡선을 나타내었다. 그림에서 보듯이 저온부에서는 일정한 가열조건하에 있는 1/4T 외부 표면균열에 대한 허용압력곡선(HR for outer flaw)이, 고온부에서는 정상상태 조건하의 1/4T 내부 표면균열에 대한 허용압력곡선 (SS for inner flaw)이 최종 운전제한곡선을 결정하였다.

App. G 에서 제시한 정상상태 조건하의 1/4T 외부 표면균열에 대한 허용압력곡선(SS for outer flaw)은 가장 비보수적인 결과를 보여 운전제한곡선에 반영되지 않았다. 이는 SS for outer flaw 조건이 HR for outer flaw 조건에 비해 균열선단에서의 온도는 높고 열응력에 의한 응력확대계수가 작용하지 않아 허용압력 계산에 사용되는 $K_{IR} - K_{IT}$ 값이 항상 크기 때문으로 판단된다.

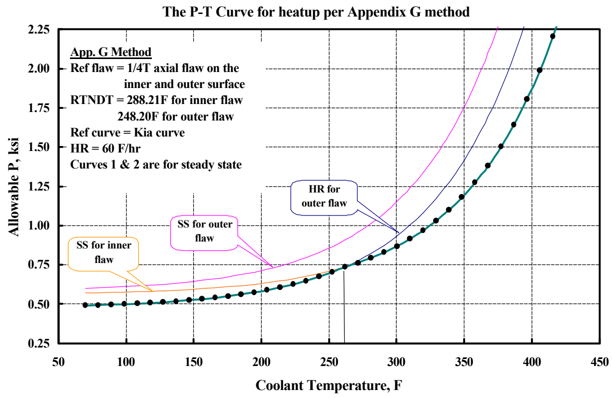


Fig. 5 App. G 절차에 따라 운전제한곡선 작성시 계산된 허용압력곡선과 최종 운전제한곡선

4.2.2 Current Method

Fig. 6 에는 본 논문에서 사용된 방법에 따라 계산된 각 경우의 허용압력곡선과 최종 운전제한곡선을 나타내었다. 그림에서 보듯이 본 논문에서는 App. G 에 제시된 3 가지 조건 이외에 일정한 가열조건하에 있는 1/4T 내부 표면균열에 대한 허용압력곡선(HR for inner flaw)을 추가로 고려하였다.

그림에서 보듯이 최종 운전제한곡선은 3 가지 경우의 허용압력곡선에 의해 결정된다. 저온부에서는 일정한 가열조건하에 있는 1/4T 외부 표면균열에 대한 허용압력곡선(HR for outer

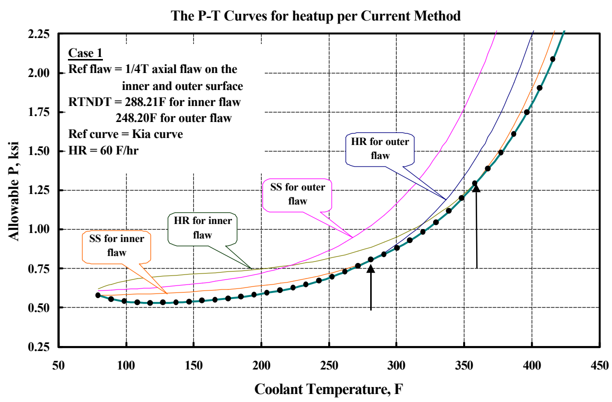


Fig. 6 본 논문에서 운전제한곡선 작성시 계산된 허용압력곡선과 최종 운전제한곡선

flaw)이, 고온부에서는 일정한 가열조건하에 있는 1/4T 내부 표면균열에 대한 허용압력곡선(HR for inner flaw)이 그리고 그 사이온도에서는 정상상태 조건하의 1/4T 내부 표면균열에 대한 허용압력곡선(SS for inner flaw)이 최종 운전제한곡선을 결정한다.

SS for inner flaw 조건에 비해 HR for inner flaw 조건은 다음 두가지 차이를 가진다. 우선 HR for inner flaw 조건에서는 열전달로 인해 균열선단에서의 온도가 SS for inner flaw 에 비해 낮다. 그러나 가열조건에서 내부 표면균열선단에는 압축응력 및 음의 응력확대계수가 작용한다. 따라서 각 조건에서의 허용압력 계산에 사용되는 $K_{IR} - K_{IT}$ 값의 상대적인 크기가 변할 수 있다. Fig. 6 의 경우를 보면 본 논문에서 사용된 조건에서는 내부표면균열 선단에 작용하는 음의 응력확대계수에 의한 영향이 열전달에 의한 영향보다 저온부에서는 크고 고온부에서는 적어지는 것을 알 수 있다. 이로인해 Fig. 6 에서와 같이 저온부에서는 SS for inner flaw 조건에 대한 허용압력이 낮고 고온부에서는 HR for inner flaw 조건에 의한 허용압력이 낮아진다.

App. G 방법과 본 논문에서 사용한 방법을 비교한 결과, SS for outer flaw 조건이 운전제한곡선 작성에 반영되지 않은 점은 App. G 방법에 의한 결과와 같지만 App. G 방법에서 고려하지 않은 HR for inner flaw 조건이 실제 운전제한곡선 작성에 영향을 미침을 확인하였다.

4.3 Code Case 적용에 따른 영향

4.3.1 파괴인성곡선의 영향

Fig. 7 에는 Code Case N-640 에 따라 동적파괴인성곡선 대신 정적파괴인성곡선을 사용하여 작성한 운전제한곡선을 나타내었다. Case 1 의 경우와 같이 저온부에서는 일정한 가열조건하에 있는 1/4T 외부 표면균열에 대한 허용압력곡선(HR for outer flaw)이, 고온부에서는 일정한 가열조건하에 있는 1/4T 내부 표면균열에 대한 허용압력곡선(HR for inner flaw)이 그리고 그 사이온도에서는 정상상태 조건하의 1/4T 내부 표면균열에 대한 허용압력곡선(SS for inner flaw)이 최종 운전제한곡선을 결정한다. 최종 운전제한곡선은 기본조건인 Case 1 에 비해 저온부에서 약 130 psi 정도 증가하였으며 이는 냉각곡선의 경우[7]와 거의 같은 값이다.

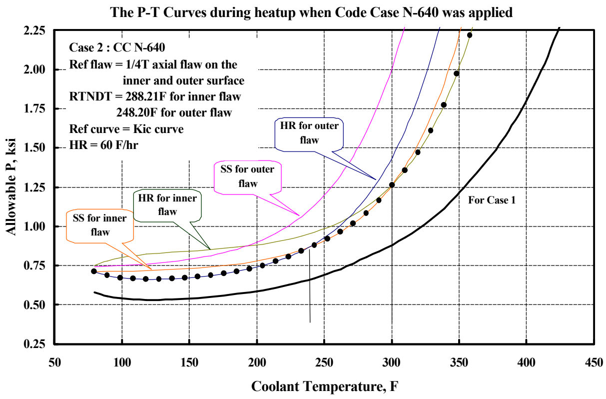


Fig. 7　Code Case N-640 적용시 운전제한곡선

4.3.2 균열방향의 영향

Fig. 8 에는 Code Case N-588 을 적용한 운전제한곡선을 나타내었다. Limting material 인 원주방향 용접부에 원주방향균열을 가정하는 경우 조사취화 정도가 덜한 모재부의 축방향균열을 가정한 해석을 같이 수행하여 최소허용압력을 구하여야 한다. 비록 모재부의 조사취화 정도가 용접부에 비해 심각하지 않더라도 동일한 하중조건에서 축방향균열 선단에서의 응력확대계수가 원주방향균열에 비해 커지므로 허용압력이 낮아질 수 있기 때문이다. 본 해석에는 원주방향용접부의 원주방향균열 및 모재의 축방향균열에 대해 각각 3 가지 조건(HR for outer flaw, HR for inner flaw, SS for inner flaw)에 대한 해석을 수행하였으며 Fig. 8 에는 최종적으로 운전제

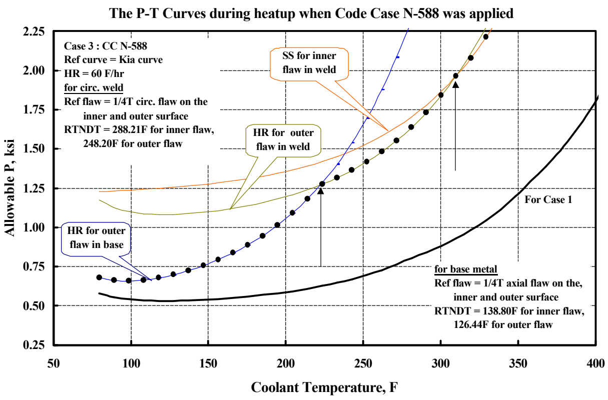


Fig. 8　Code Case N-588 적용시 운전제한곡선

한곡선에 영향을 미치는 허용압력곡선만을 나타내었다.

저온부에서는 모재부의 축방향균열, 고온부에서는 용접부의 원주방향균열에 의해 운전제한곡선이 결정되며 이는 냉각곡선의 경우[7]와 같다. 원주방향용접부의 경우 HR for outer flaw, SS for inner flaw 조건에서의 허용압력곡선만 운전제한곡선에 영향을 미친다. Fig. 6 및 7 에서 영향을 미치는 것으로 나타난 HR for inner flaw 조건은 허용압력곡선들이 전체적으로 상승함에 따라 운전제한곡선 작성대상 온도 및 압력 범위에서는 사라지게 된다. 모재부의 축방향균열의 경우 HR for outer flaw 조건에 의한 허용압력곡선이 전 영역에 걸쳐 가장 보수적인 허용압력을 나타내었다. 이는 모재부의 경우 조사취화정도가 덜하고 두 원자로 압력용기 두께에 따른 RT_{NDT} 의 차이가 상대적으로 적어 Case 1 에 비해 내부균열선단과 외부균열선단에서의 파괴인성치의 차이가 줄어들어 내부균열을 가정한 경우의 보수성이 줄어들기 때문으로 볼수 있다. 최종 운전제한곡선은 기본조건인 Case 1 에 비해 저온부에서 약 100 psi 정도 증가하였으며 이는 냉각곡선의 경우[7]와 거의 같은 값이다.

4.3.3 파괴인성곡선 및 균열방향의 영향

Fig. 9 에는 Code Case N-588 과 N-640 이 모두 적용된 경우 작성된 운전제한곡선을 나타내었다. Case 3 와 마찬가지로 용접부에는 원주방향균열, 모재부에는 축방향균열을 가정하여 해석을 수행하였으며 전체적으로 Case 3 와 유사한 거동을 보인다. 최종 운전제한곡선은 기본조건인 Case 1 에 비해 저온부에서 약 260 psi 정도 증가하였으며 이는 냉각곡선의 경우[7]와 거의 같은 값이다.

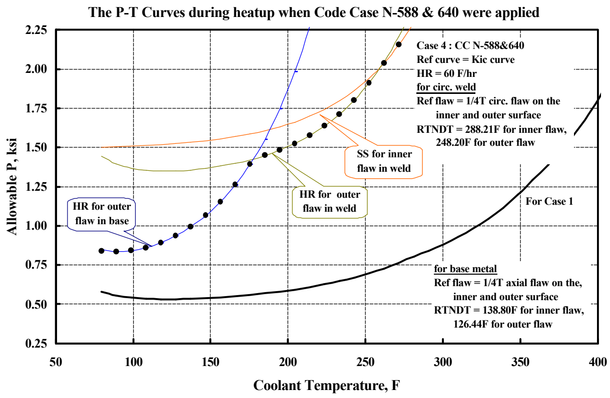


Fig. 9 Code Case N-588 & N-640 적용시의 운전제한곡선

4.4 운전제한곡선 작성절차

앞에서 제시한 바와 같이 최근 Code Case 들이 도입되고 Flange 요건 및 LTOP 요건 등이 적용됨에 따라 운전제한곡선 작성시 고려하여야할 사항들이 많아져 절차가 매우 복잡해졌다. 이로 인한 혼동을 방지하기 위해 Fig. 10 에 본 논문에서 사용한 절차를 간략히 도시하였다.

이 절차에 따르면 우선 대상 원자로 압력용기의 원주방향 용접부가 조사취화 관점에서 Limiting Material 인지 여부에 따라 Code Case 적용 여부가 결정된다. 그림의 왼쪽에서 보듯이 원주방향 용접부가 Limiting Material 인 경우 냉각곡선 작성시 App. G 부터 Code Case N-588 및 640 을 동시에 적용하는 것까지 4 가지 옵션을 선택할 수 있다. 이중 Code Case N-588 이 적용되는 경우는 조사취화 정도가 덜한 축방향용접부 혹은 모재부의 축방향균열을 가정한 해석도 같이 수행하여야 한다. 이에 비해 축방향용접부나 모재가 Limiting Material 인 경우 2 가지 옵션으로 줄어든다. 각각의 경우에 대해 3 가지 조건(HR for outer flaw, HR for inner flaw, SS for inner flaw)에 대한 해석을 수행하여 허용압력을 구한다. 최종적으로 가열운전조건에서의 운전제한곡선은 각 옵션에 대한 모든 허용압력곡선의 최소치로 구할 수 있다.

Fig. 10 에는 본 논문에서는 다루어지지 않았지만 운전제한곡선 작성시 추가로 고려되어야 하는 Flange Requirement 및 LTOP 요건도 같이 나타내었다. LTOP 평가를 통해 LTOP setpoint 및 적용온도를 해당 Code Case 에 따라 결정하여 운전절차서에 반영함으로써 운전제한곡선과 관련된 평가가 완료된다.

4.5 수명연장의 영향

앞의 Fig. 10 에서 보듯이 최신 Code Case 적용으로 40 년 수명말기의 운전제한곡선의 안전 운전영역이 크게 확대되었다. 연장운전을 고려하는 경우 조사취화로 인해 60 년 연장운전 말기의 무연성천이기준온도가 더욱 증가할 것으로 예상되나(288.21°F -> 304.5°F), 그로 인한 운전제한곡선의 이동은 크지 않을 것이므로[11] 충분한 안전 운전영역이 확보될 것으로 예상할 수 있다.

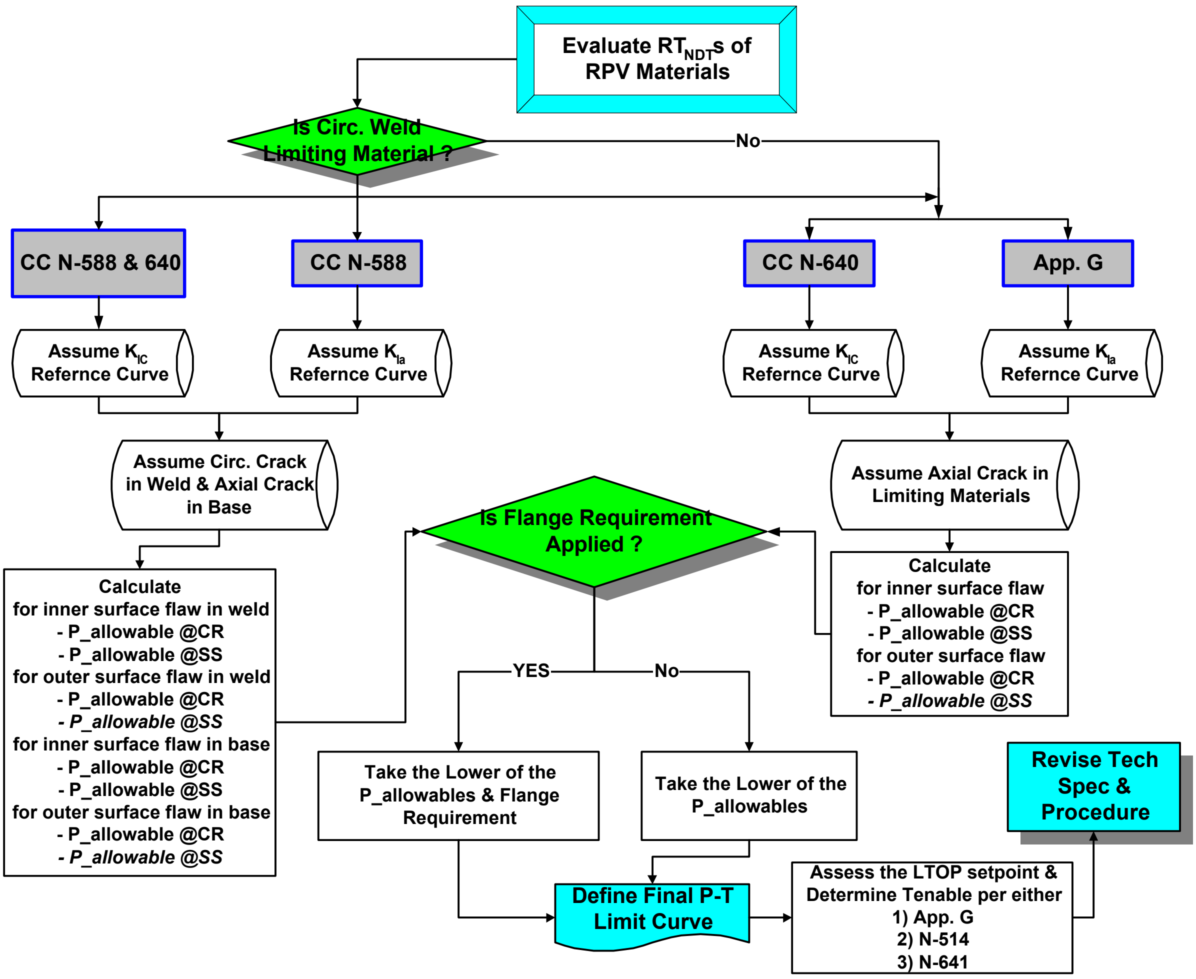


Fig. 10 Comprehensive Procedure of the P-T Limit Curve Construction for heatup process

5. 결론

본 논문에서는 조사취화가 심한 원자로 압력용기를 대상으로 App. G 방법 및 절차의 타당성을 확인하고 최신 Code Case 를 적용하여 가압경수로 가열운전에 적용되는 운전제한곡선을 작성하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정상상태 조건의 1/4T 내부 표면균열, 일정 가열율 조건의 1/4T 내부 표면균열, 정상상태 조건의 1/4T 외부 표면균열, 일정 가열율 조건의 1/4T 외부 표면균열 등 4 가지 조건에 대한 허용압력곡선을 구하고 그 하한치로 가열운전에 대한 운전제한곡선을 작성하였다.

2. 조사취화가 심한 원자로 압력용기 부위에 축방향균열을 가정하는 경우 고온부에서는 일정 가열율 조건의 1/4T 내부 표면균열에 의한 허용압력이 가장 낮아 질 수 있으므로 이를 반영하여 App. G 방법의 정상상태 조건의 1/4T 외부 표면균열 조건은 일정 가열율 조건의 1/4T 내부 표면균열 조건으로 대치되어야 한다.

3. App. G, P-T Calculator, Westinghouse 방법 등과 본 논문에서 사용한 방법으로 작성된 운전제한곡선을 비교한 결과 전 온도구간에서 Westinghouse 방법이 다소 보수적인 결과를 보였으며 본 논문에서 사용한 방법은 P-T Calculator 결과와 저온부에서는 30 psi 이내, 고온부에서는 그 이내로 일치하는 결과를 보였다.

4. Limiting Material 이 원주방향용접부인 원자로 압력용기에 Code Case N-588 을 적용하는 경우 조사취화 정도가 덜한 모재부의 축방향균열에 대한 해석도 수행하여야 하며 저온부에서는 모재의 축방향

균열, 고온부에서는 용접부의 원주방향균열에 의해 허용압력이 결정된다.

5. Code Case 적용으로 가열운전 조건에서의 운전허용영역이 크게 증가하였으며 N-640, N-588, N-588&640 의 순으로 그 영향이 크게 나타났다.

참고문헌

[1] USNRC, *Fracture Toughness Requirements*, 10CFR50 App. G, 1995.
[2] ASME, *Fracture Toughness Criteria for Protection Against Failure*, B&PV Code Sec. XI Appendix G, 1998.
[3] EPRI, *Reactor Coolant System Heatup/Cooldown Curve Calculator*, EPRI TR-102552, 1993.
[4] 이택진, 최재붕, 김영진, 박윤원, 정명조, "원자로용기 건전성평가를 위한 RVIES 시스템의 개발," 대한기계학회논문집 A, 제 24 권 제 8 호, pp. 2083~2090, 2000.
[5] 장창희, "영향계수를 이용한 원자로 압력용기의 운전제한곡선 작성 : 냉각곡선," 대한기계학회논문집 A, 제 26 권 제 3 호, pp.505-513, 2002.
[6] 장창희, 문호림, 정일석, "원자로 압력용기의 운전제한곡선 작성 방법 및 변수 민감도 분석: 냉각곡선," 제 8 회 KINS 기기건전성 Workshop, 2001.
[7] C. H. Jang, H. R. Moonn, and I. S. Jeong, "Application of Code Cases in the P-T Limit Curve Construction for the Highly Embrittled Reactor Pressure Vessel," presented at the 9th Workshop on the Structural Integrity of Nuclear Components, Cheju, Korea, April 14-17, 2002.
[8] ASME, *Alternative to Reference Flaw Orientation of Appendix G for Circumferential Welds in Reactor Vessel*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, Code Case N-588, 1997.
[9] ASME, *Alternative Reference Fracture Toughness for Development of P-T Limit Curves*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, Code Case N-640, 1999.
[10] ASME, *Materials*, B&PV Code Sec. II Part D, 1995.
[11] 장창희, *고리 1 호기 원자로 압력용기 수명평가 및 노화관리방안*, KEPRI TM.97NJ26.P2001.306, 2001.
[12] KAERI, *The Final Report for the 5-th Surveillance Test of the Reactor Pressure Vessel Material (Capsule P) of Kori Nuclear Power Plant Unit 1*, KAERI-ST-K1-003/00, 2000.
[13] I. S. Raju and J. C. Newman, Jr., "Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels," J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 104, pp.293-298, 1982.
[14] I. S. Raju and J. C. Newman, Jr., "Stress-Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes and Rods under Tension and Bending Loads," in Fracture Mechanics: Seventeenth Volume, ASTM STP 905, ASTM, Philadelphia, pp. 789-805, 1986.
[15] M. Bergman, "Stress Intensity Factors for Circumferential Surface Cracks in Pipes," Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 18, No. 10, pp. 1155-1172, 1995.