

# 원자로 운전을 위한 압력/온도 한계곡선의 설정

## Generation of Pressure/Temperature Limit Curve for Reactor Operation

정 명 조\*  
Jhung, Myung-Jo

박 윤 원\*\*  
Park, Youn-Won

### 요 지

핵분열로 인한 고온, 고압의 냉각수를 유지하는 원자로 용기는 원자로의 냉각 또는 가열시 압력에 의한 응력과 함께 열응력이 가해지고 원자로 벽의 온도변화에 따라 파괴인성치가 변화하기 때문에 임의의 결함이 존재할 경우 건전성 확보가 쉽지 않다. 따라서 가상결함이 성장하지 않도록 압력과 온도를 조정하면서 냉각 및 가열시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 원자로 운전 중 냉각 및 가열시 안전하게 운전하기 위한 압력/온도 한계곡선을 구하는 절차에 필요한 이론을 조사하였고 이의 도출을 위한 해석과정을 전산화하였다. 국내원전 중 가장 오래된 고리 1호기에 대한 압력/온도 한계곡선을 다양한 냉각 및 가열률에 따라 설정하였고 이들 결과를 검토하였다.

### Abstract

A reactor pressure vessel, which contains fuel assemblies and reactor vessel internals, has the thermal stress resulting from the cool-down and heat-up of the vessel wall in combination with the pressure stress from system pressure resulting in large stresses. The combination of the pressure stress and thermal stress along with a decrease in fracture toughness may cause through-wall propagation of a relatively small crack. Therefore, it is necessary to define the relations between operating pressure and temperature during cool-down and heat-up. In this study, theory of fracture mechanics for a pressure/temperature limit curve is investigated and a numerical procedure for generating it is developed. Plant-specific limit curves for the Kori unit 1 plant, the oldest nuclear power plant in Korea, have been obtained for several cooling and heating rates and their results are discussed.

*Keywords* : pressure/temperature limit curve, reactor vessel, stress intensity factor, fracture toughness

## 1. 서 론

원자로 용기는 핵연료집합체와 관련 구조물들

을 내장하고 있는 압력용기로서 핵분열로 인한 고온, 고압의 냉각수를 유지하는 매우 중요한 부품이다. 따라서 원자력발전소의 수명기간 동안

\* 정회원·원자력안전기술원 기계설비실, 선임연구원  
\*\* 원자력안전기술원 기술개발실, 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론회를 1998년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

충분한 건전성이 유지되도록 운전되어야 한다. 정상출력시 원자로 용기는 고온상태에 있으므로 재료의 파괴인성치가 매우 크고 내압에 의한 응력만이 존재하기 때문에 건전성 확보에 큰 어려움이 없다. 그러나 냉각 또는 가열시에는 압력에 의한 응력과 함께 열응력이 가해지고 원자로 벽의 온도변화에 따라 파괴인성치가 변화하기 때문에 임의의 결합이 존재할 경우 건전성 확보가 쉽지 않다. 즉 임의 크기의 결합을 가정하고 운전 압력 및 온도의 변화에 대하여 가상결합이 성장하지 않도록 압력과 온도를 조정하면서 냉각 및 가열시 운전할 필요가 있으며 이를 위하여 원자로 운전의 지침으로 삼는 압력과 온도의 관계가 구하여 지는데 이를 압력/온도 한계곡선이라고 한다.

본 연구에서는 원자로 운전 중 냉각 및 가열시 안전하게 운전하기 위한 압력/온도 한계곡선을 구하는 절차에 필요한 이론을 조사하였고 이의 도출을 위한 해석과정을 전산화하였다. 정상운전시 원자로 용기가 받는 주요 하중은 압력에 의한 응력과 온도차에 의해 발생하는 열응력이므로 원자로 용기내의 압력과 주입되는 냉각재의 온도변화가 주어지면 이들로 부터 시간에 따른 용기벽에서의 온도와 응력분포를 구하여 응력확대계수를 계산하였고, 중성자조사량과 용기 재질의 화학성분으로 부터 기준무연성천이온도의 분포를 구하여 파괴인성치를 계산하였다. 이들 값을 비교하여 임의의 결합이 성장하지 않도록 압력과 온도의 한계를 설정하였다. 예제해석으로 고리 1 호기의 압력/온도 한계곡선을 도출하였고 그 결과에 대하여 검토하였다.

## 2. 해석식의 전개

### 2.1 온도분포해석

용기벽의 온도분포  $T(r, t)$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>1)</sup>.

$$\rho c T_r - K \left( \frac{1}{r} T_r + T_{rr} \right) = 0 \quad (1)$$

초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$T(r, 0) = T_0 \quad (2.1)$$

$$T_r(r_0, t) = 0 \quad (2.2)$$

$$-K T_r(r_i, t) = h [T_c(t) - T(r_i, t)] \quad (2.3)$$

여기서  $T_0, K, h, \rho, c, r_0, r_i$ 는 각각 냉각재의 온도, 재료의 열전도계수, 냉각수와 용기사이의 열전달계수, 재료의 밀도, 재료의 비열, 용기의 외경 및 내경이고 하첨자  $r$ 은 반경방향에 대한 미분을 나타낸다.

유한차분법에 의해  $N$ 절점에서의 온도를 구하면<sup>2)</sup>

$$n=1 ;$$

$$T_n^{i+\Delta t} = \left[ 1 - \frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \left( 1 + \frac{\Delta r}{r_1} \right) - \frac{\Delta t h}{\rho c (\Delta r)} \right] T_1^i + \frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta r}{r_1} \right) T_2^i + \frac{\Delta r h}{K} T_c^i \right] \quad (3.1)$$

$$1 < n < N ;$$

$$T_n^{i+\Delta t} = \left[ 1 - \frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \left( 2 + \frac{\Delta r}{r_1} \right) \right] T_n^i + \frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \left[ \left( 1 + \frac{\Delta r}{r_n} \right) T_{n+1}^i + T_{n-1}^i \right] \quad (3.2)$$

$$n=N ;$$

$$T_N^{i+\Delta t} = \left[ 1 - \frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \right] T_N^i + \frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} T_{N-1}^i \quad (3.3)$$

이고 이 때 열역학 제 2 법칙을 만족하기 위하여 다음 두 조건이 성립되어야 한다.

$$\frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \left( 2 + \frac{\Delta r}{r_1} \right) \leq 1 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta t K}{\rho c (\Delta r)^2} \left( 1 + \frac{\Delta r}{r_1} \right) + \frac{\Delta t h}{\rho c (\Delta r)} \leq 1 \quad (5)$$

한편 ASME Code Section III, Division 1, Appendix I<sup>3)</sup>에 의하면 열전도계수  $K$ 와 열확산 계수  $k$ 는 온도의 함수로서 부록에서와 같이 표현할 수 있고 이를 그림으로 보이면 Fig. 1과 같다. 또 열전달계수  $h$ 는 냉각재의 평균속도  $v$ 와 수력반경  $D$  및 온도의 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>4)</sup>.

$$h = .148 \left( 1 + \frac{T}{10^2} - \frac{T^2}{10^5} \right) \frac{v^{0.8}}{D^{0.2}} \quad (6)$$

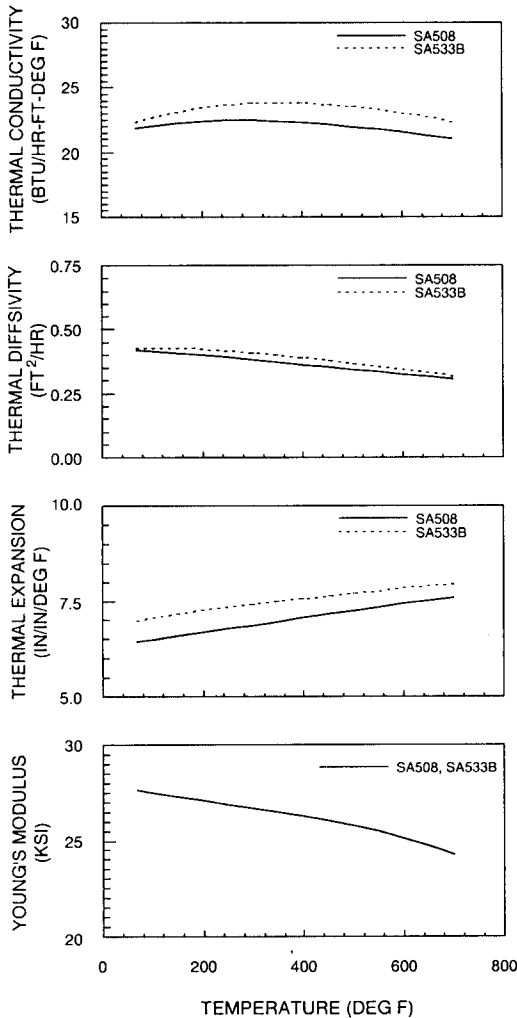


Fig. 1 Material properties of SA508 and SA533B

여기서 냉각재의 평균속도  $v=Q/\rho A$ 이고  $\rho$ 는 밀도,  $Q$ 는 유량 그리고  $A$ 는 유효흐름단면적이다.

### 2.2 응력해석

#### (1) 열응력

앞절에서 구한 온도분포로부터 열응력을 구하면<sup>5)</sup>

$$\sigma_r(r, t) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[ \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r T(r, t) r dr - T(r, t) + \frac{1}{r^2} \frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r, t) r dr \right] \quad (7)$$

이고 여기서 Young을  $E$ 와 열팽창계수  $\alpha$ 는 평균 온도  $T_{avg}$ 의 함수로서 다음과 같다<sup>3)</sup>.

$$T_{avg} = \frac{2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T(r, t) r dr \quad (8)$$

$$E = 27.968 - .53395 \frac{T_{avg}}{10^2} + .65784 \frac{T_{avg}^2}{10^5} + .922014 \frac{T_{avg}^3}{10^8} \quad (9)$$

#### (2) 압응력

내압  $p$ 에 의한 응력  $\sigma_p(r, t)$ 는 다음과 같다<sup>5)</sup>.

$$\sigma_p(r, t) = p(t) \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \times \frac{r_o^2 + r^2}{r^2} \quad (10)$$

용기의 내벽에 압력  $p$ 가 작용할 때  $r=r_i+1/4(r_o-r_i)$  및  $r=r_i+3/4(r_o-r_i)$ 에서의 응력은 각각 다음과 같다.

$$\sigma(r_{1/4}, t) = p \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \times \frac{r_o^2 + (1/4r_o + 3/4r_i)^2}{(1/4r_o + 3/4r_i)^2} \quad (11)$$

$$\sigma(r_{3/4}, t) = p \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \times \frac{r_o^2 + (1/4r_i + 3/4r_o)^2}{(1/4r_i + 3/4r_o)^2} \quad (12)$$

### 2.3 파괴역학해석

#### (1) 가상결합의 크기

원자로 용기의 두께를  $w$ 라 할 때 결합깊이가

$1/4w$ 이고 결합깊이가  $3/2w$ 인 표면반타원결합을 가정하며 이 때 결합의 형상비는 결합깊이/결합길이 =  $(1/4w)/(3/2w) = 1/6$ 이다<sup>6)</sup>.

(2) 응력확대계수

앞절에서 구한 응력과 가정된 결합의 크기 및 형태로 부터 ASME Code Section III, Division 1, Appendix G<sup>6)</sup>의 절차에 따라 막응력에 의한 응력확대계수  $K_{lm}$ 값을 구하면

$$K_{lm} = M_m \times \sigma_m \quad (13)$$

이고 여기서  $M_m$ 은 막응력계수로 참고문헌[6]의 Fig. G-2214-1로 부터 구할 수 있고  $\sigma_m$ 은 막응력 (ksi)으로 다음과 같이 벽면을 따라 구해지는 평균응력이다.

$$\sigma_m = \sigma_{avg} = \frac{1}{r_o - r_i} \int_{r_i}^{r_o} \sigma_p(r, t) dr = \frac{r_i}{r_o - r_i} p \quad (14)$$

정상상태의 경우  $r_o=72.5$  in,  $r_i=66.5$  in일 때  $\sigma(r_{1/4})/\sigma_{avg}=1.022$ 이므로 보수적으로  $1/4w$ 에서의 값을 사용할 수 있다.

온도차이에 의한 응력확대계수  $K_{lt}$ 는

$$K_{lt} = M_t \times \Delta T_m \quad (15)$$

이고 여기서  $M_t$ 는 온도보정계수로 참고문헌[6]의 Fig. G-2214-2로 부터 구하고  $\Delta T_m$ 는 원자로 내면과 외면의 온도차(°F)이다. 그러나 이 식을 이용하면 원자로 벽의 온도차를 알고 있을 때 열응력을 구하지 않고도 쉽게 응력확대계수를 구할 수 있으나 너무 보수적인 값을 보이기 때문에 아래와 같이 열응력을 직접 구하여 계산하기도 한다. 열응력은 보통 굽힘응력의 형태로 나타나기 때문에 굽힘에 의한 응력확대계수  $K_b$  값은

$$K_b = M_b \times \sigma_b \quad (16)$$

이고 여기서  $\sigma_b$ 는 굽힘응력 (ksi)이고  $M_b$ 는 굽힘

응력계수이며 형상비가  $1/6$ 이고 크기가  $1/4w$ 인 결합의 경우  $M_b = (2/3) M_m$  (참고문헌[6]의 Fig. G-2214-1)이다.

(3) 파괴인성치

원자로 용기의 재질 (일반적으로 SA533 Grade B, SA508 Class 1, SA508 Class 2, SA508 Class 3)에 대한 파괴인성치  $K_{IR}$  (ksi  $\sqrt{\text{in}}$ )은

$$K_{IR} = 26.78 + 1.223 \exp [0.0145 (T - RT_{NDT} + 160)] \quad (17)$$

이고 여기서  $T$ 는 결합선단에서의 온도(°F)이고  $RT_{NDT}$ 는 재료의 온도가 낮아짐에 따라 인성치가 급격하게 감소하는 기준무연성천이온도로서

$$RT_{NDT} = RT_{NDT0} + \Delta RT_{NDT} \quad (18)$$

이다. 이 때  $RT_{NDT0}$ 는 조사전의  $RT_{NDT}$ ,  $\Delta RT_{NDT}$ 는 조사후의  $RT_{NDT}$  변화량이다. 한편  $\Delta RT_{NDT}$ 는 구리와 니켈의 함유량에 의한 화학인자 [CF]와 조사량의 함수로 부터 구할 수 있고 이 때 필요한 중성자조사량  $f$  ( $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > \text{MeV}$ )는 다음과 같이 벽면을 따라 지수적으로 감쇄한다고 가정한다<sup>7)</sup>.

$$f = f_{surf} e^{-0.24a} \quad (19)$$

여기서  $f_{surf}$ 는 내벽에서의 조사량 ( $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>,  $E > 1 \text{ MeV}$ )이고  $a$ 는 내벽면으로부터의 길이 (in)이다.

따라서  $RT_{NDT}$ 와 중성자조사량  $f$ 의 관계는 식 (18)과 (19)로 부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$RT_{NDT} = RT_{NDT0} + [CF] \times (f_{surf} e^{-0.24a})^{0.28 - 0.101 \log(f_{surf} e^{-0.24a})} \quad (20)$$

### 3. 압력/온도 한계곡선의 설정

#### 3.1 가열 및 냉각

가열과 냉각시에는 열응력에 의한 응력확대계

수  $K_{II}$  및 재료의 파괴인성치  $K_{IR}$ 을 구한 후에 내압을 상승시키면서  $K_{Im}$ 을 계산하여 다음 식이 만족되는 최대허용압력을 구한다<sup>6)</sup>.

$$2K_{Im} + K_{II} \leq K_{IR} \quad (21)$$

여기서  $K_{Im}$ 에 2를 곱한 것은 막응력에 대해 안전여유를 고려한 것이고 식 (13)으로 부터

$$2K_m \sigma_m \leq K_{IR} - K_{II} \quad (22)$$

이며 여기서  $\sigma_m$ 대신 평균응력  $\sigma_{avg}$ 의 값을 사용해야 하나 보수적으로  $1/4w$  또는  $3/4w$ 에서의 값인 식 (11) 및 (12)의 값을 사용하였다.

가열시에는 용기의 안쪽에 압축응력, 바깥쪽에 인장응력이 생기고, 냉각시에는 이와 반대의 응력이 발생하기 때문에 최대압력을 구하기 위해서는 가열시에는  $3/4w$ 위치에서, 냉각시에는  $1/4w$ 위치에서의 압력이 고려되어야 한다. 가열시  $3/4w$ 위치의 압력은

$$p_{max}(3/4w) = \frac{K_{IR} - K_{II}}{2M_m \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{r_o^2 + (1/4r_o + 3/4r_i)^2}{(1/4r_o + 3/4r_i)^2}} \quad (23)$$

이고 정상상태에서의 최대압력은  $1/4w$ 위치에서

$$p_{max}(1/4w) = \frac{K_{IR}}{2M_m \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{r_o^2 + (1/4r_o + 3/4r_i)^2}{(1/4r_o + 3/4r_i)^2}} \quad (24)$$

이며 이들 두 압력의 최소압력이 주어진 온도에 대한 최대 운전압력이다.

냉각시에는 가열시와 마찬가지로의 절차에 따라 허용압력을 결정한다. 냉각시  $1/4w$ 위치에서의 압력은

$$p_{max}(1/4w) = \frac{K_{IR} - K_{II}}{2M_m \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{r_o^2 + (1/4r_o + 3/4r_i)^2}{(1/4r_o + 3/4r_i)^2}} \quad (25)$$

이고 정상상태에서의 최대압력은 식 (24)로 가열시에서와 동일하다.

### 3.2 누수시험

누수시험시에는 재료의 파괴인성치가 압력에 의한 응력확대계수의 1.5배보다 커야한다. 즉, 다음 식이 만족되어야 한다<sup>6)</sup>.

$$1.5K_{Im} \leq K_{IR} \quad (26)$$

$$1.5K_m \sigma_m \leq K_{IR} \quad (27)$$

용기의 내벽에 압력  $p$ 가 작용하고  $1/4w$ 와  $1/3w$ 의 위치에 결함이 있을 경우 최대응력은  $1/4w$ 에서 발생하므로 다음을 만족하는 식이 누수시험에서의 한계곡선이 된다.

$$p_{max}(1/4w) = \frac{K_{IR}}{1.5M_m \frac{r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \frac{r_o^2 + (1/4r_o + 3/4r_i)^2}{(1/4r_o + 3/4r_i)^2}} \quad (28)$$

## 4. 고리 1호기 압력/온도 한계곡선

### 4.1 기준무연성천이온도의 계산

고리1호기 원자로 용기 용접부의 경우  $RT_{NDT} = 70^\circ\text{F}$ 이고, 구리와 니켈의 함량이 각각 0.22%와 0.69%이므로 참고문헌[7]의 Table 1에서  $[CF] = 182^\circ\text{F}$  이므로  $RT_{NDT}$ 와 중성자조사량  $f$ 의 관계는 식 (20)로 부터 다음과 같다.

$$RT_{NDT} = 70 + 182 \times (f_{surf} e^{-0.24a})^{0.28 - 0.101 \log(f_{surf} e^{-0.24a})} \quad (29)$$

고리 1호기의 경우  $w = 6.5$ 인치이므로 용기벽의  $1/4w$ 와  $3/4w$ 위치에서의  $RT_{NDT}$ 는 다음과 같다.

$$RT_{NDT}(1/4w) = 70 + 182 \times (f_{surf} e^{-0.40625a})^{0.28 - 0.101 \log(f_{surf} e^{-0.40625a})} \quad (30.1)$$

$$RT_{NDT}(3/4w) = 70 + 182 \times (f_{surf} e^{-1.17})^{0.28 - 0.101 \log(f_{surf} e^{-1.17})} \quad (30.2)$$

그러므로 용기내벽면의 중성자조사량을 알면 식(30)으로 부터  $RT_{NDT}$ 를 계산할 수 있다. 초기 설계에서 사용된 유효전출력 운전년수(Effective Full Power Year : EFPY)에 대한 조사량 및  $RT_{NDT}$ 는 Fig. 2와 같고 이들로 부터 벽면에 따른  $RT_{NDT}$ 의 분포는 Fig. 3과 같다. 설계시 사용된 24 EFPY에서의 내벽면 중성자조사량은  $f_{surf} = 4.25 \text{ E19n/cm}^2$ 이고 이 때 내벽면, 벽의 1/4 및 3/4위치에서의  $RT_{NDT}$ 는 각각  $319^\circ\text{F}$ ,  $302^\circ\text{F}$  및  $266^\circ\text{F}$  이다. 수명말기에서의  $RT_{NDT}$ 가  $300^\circ\text{F}$ 를 초과할 경우 가압열충격에 의한 사고의 가능성을 평가할 필요가 있는데 4차 감시시험의 결과 수명말기의  $RT_{NDT}$ 는  $232^\circ\text{F}$ 로 상당히 작은 값이 추정되고 있으며 따라서 가압열충격 사고의 가능성이 없음을 예견할 수 있다.

#### 4.2 해석결과 및 고찰

평가에서는 조사취화에 예민한 용접부위가 가

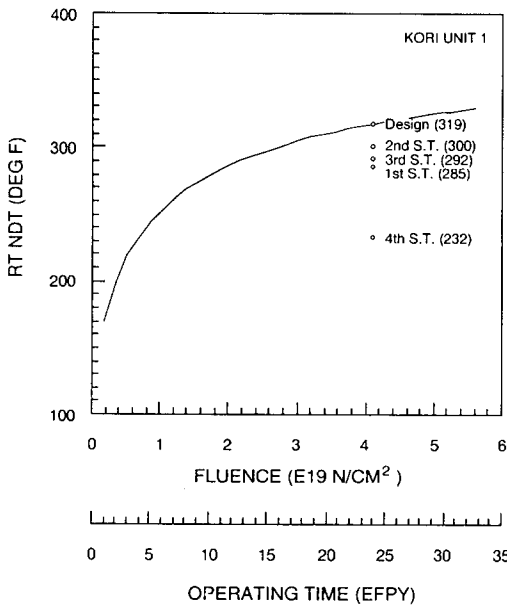


Fig. 2 Neutron fluence and  $RT_{NDT}$  as a function of operating time

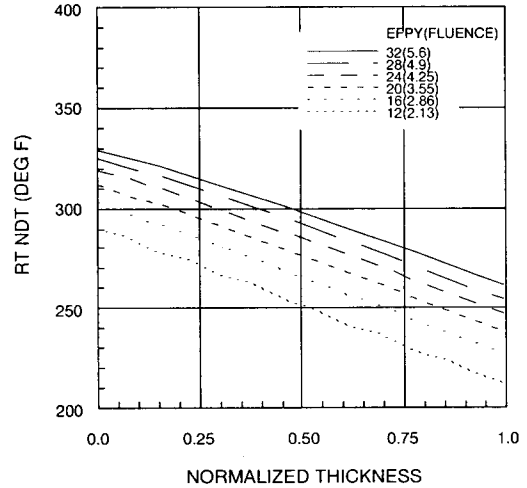


Fig. 3 Design  $RT_{NDT}$  distribution at the vessel wall

장 큰 관심사이므로 본 해석에서는 용접부위에 대하여 해석하였다. 해석에 사용된 변수들은 Table 1과 같고 결함형상은 ASME Code Section III, Appendix G<sup>(6)</sup>에서 가정한 형상계수가 1/6인 결함으로 하였다. 가열 및 냉각시의 한계곡선을 구하기 위하여 우선 용기벽면의 온도분포 및 이에 따른 열응력을 구하였고 이들로 부터 응력확대계수를 계산하였다. Fig. 4와 5는  $100^\circ\text{F/hr}$ 로 냉각 및 가열시 용기벽면의 1/4 및 3/4의 위치에서의 온도분포이고, Fig. 6과 7은 각각 냉각 및 가열시 냉각재의 온도에 따른 용기벽면 1/4 및 3/4 위치에서의 열응력확대계수이다. Fig.

Table 1 Vessel properties of Kori nuclear power plant unit 1

Property	Value
Inner radius	66.5 inches
Outer radius	72.5 inches
Operating pressure	2235 psig
Initial temperature	$60^\circ\text{F}$
Final temperature	$550^\circ\text{F}$
Effective flow area	$16.558 \text{ ft}^2$
Effective coolant flow rate	$65.9\text{E}6 \text{ lb}_m/\text{hr}$
Effective hydraulic diameter	1.0358 ft

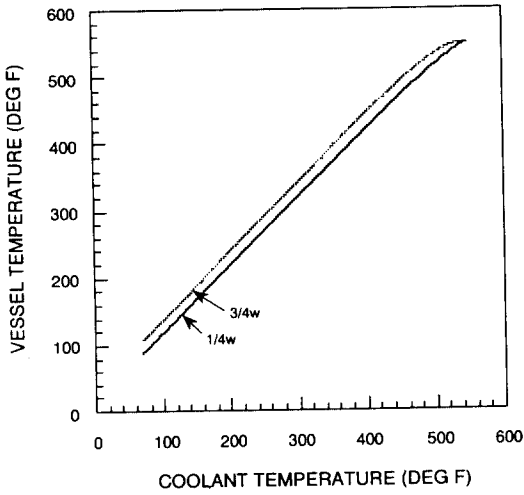


Fig. 4 Vessel temperature distribution for cool-down (100 deg F/hr)

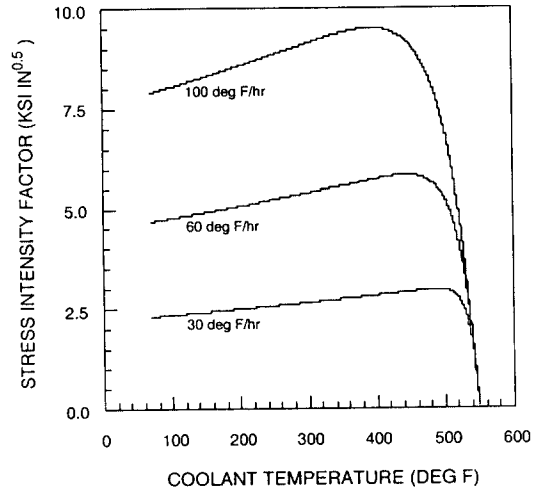


Fig. 6 Thermal stress intensity factor for cool-down

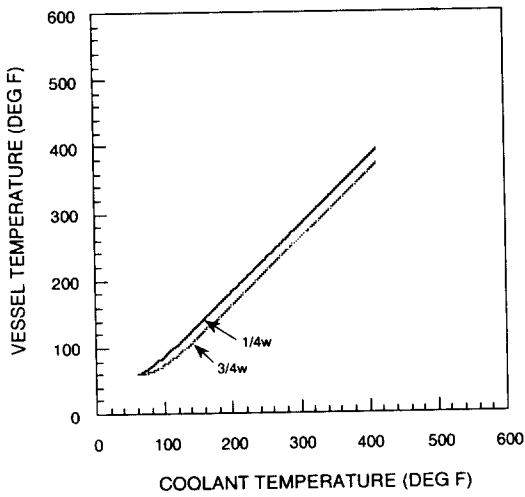


Fig. 5 Vessel temperature distribution for heat-up (100 deg F/hr)

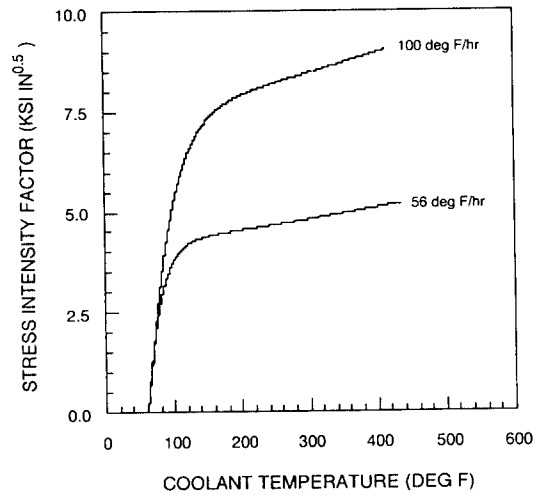


Fig. 7 Thermal stress intensity factor for heat-up

6에서 100° F/hr로 냉각시 열응력확대계수는 최대 9.5 ksi/in<sup>0.5</sup>임을 알 수 있다. 이들 결과를 이용하여 구한 압력/온도 한계곡선은 냉각 및 가열시

각각 Fig. 8 및 Fig. 9와 같으며 곡선의 우측은 운전이 허용되는 영역이고 좌측은 운전이 허용되지 않는 영역이다. 서로 다른 냉각 및 가열률에

대한 곡선을 비교한 결과 냉각시에는 고온부위에서 가열시에는 저온부위에서 각각 냉각률 및 가열률에 따라 한계곡선에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 8에서 냉각률이 0° F/hr로 표시되어 있는 곡선은 정상상태에 도달하는 경우, 즉 원자로 벽의 열응력이 무시된 경우의 압력/온도곡선을 나타낸 것이다. 핵연료의 각 주기말 또는 주

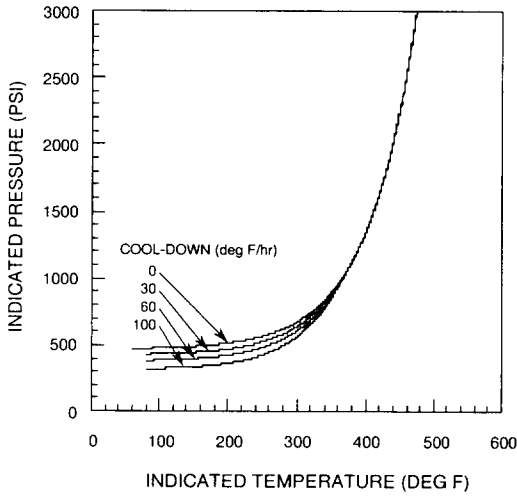


Fig. 8 Pressure/temperature limit curve for cool-down

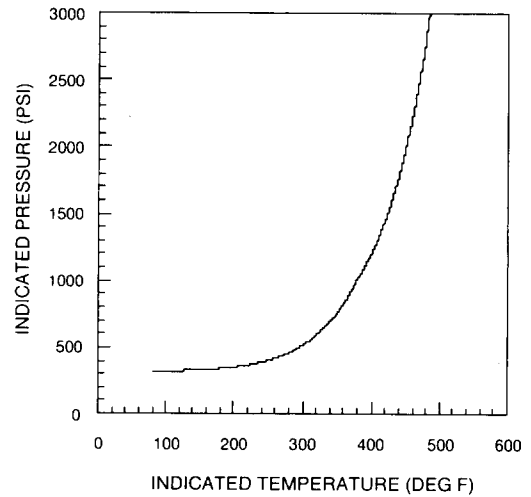


Fig. 10 Pressure/temperature limit curve for cool-down (100 deg F/hr, 32 EFPY)

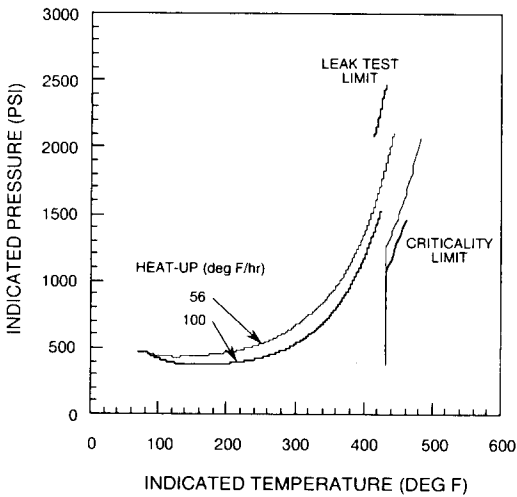


Fig. 9 Pressure/temperature limit curve for heat-up

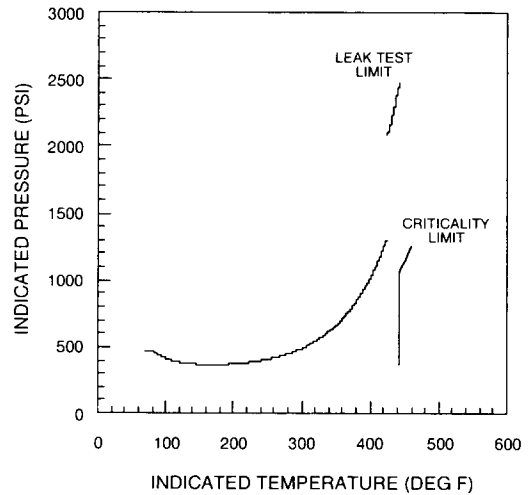


Fig. 11 Pressure/temperature limit curve for heat-up (100 deg F/hr, 32 EFPY)

기초에 원자로를 냉각시키거나 가열시킬 때 적용하는 압력/온도 이력곡선은 원자로 용기의 건전성을 확보할 수 있도록 한계곡선과 비교하여 우측에 위치하여야 한다.

참고로 고리 1호기 원자로 용기의 수명연장과 관련하여 32 EFPY에서의 압력/온도 한계곡선을 구하면 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 여기서 사용

된 내벽면의 중성자조사량은  $f_{surf} = 5.6E19n/cm^2$  이고 식 (30)으로 부터 구한 벽의 1/4 및 3/4 위치에서의  $RT_{NDT}$ 는 각각 314°F 및 280°F 이다. 시간당 100°F로 변화하는 경우의 24 EFPY곡선과 비교하면 32 EFPY에서의 한계곡선이 저온부 위에서는 거의 동일하게 설정되어 있으나 고온부 위에서는 우측에 위치하므로 운전시 더 제한적임



을 알 수 있다.

이상은 원자력발전소의 설계시 사용된 값들을 이용하여 설정된 압력/온도 한계곡선의 한 예를 보여 준 것이다. 원자로는 가동시간의 경과에 따라 정해진 주기별로 시편을 인출하여 감시시험을 수행하여 원자로 용기 재료에 대한 고속중성자의 조사효과를 평가한다. 이 때 용기내벽의 중성자 조사량이 계산되고 이를 기준으로 실제 사용되는 압력/온도 한계곡선이 결정된다.

## 5. 결 론

냉각 및 가열시 원자로를 안전하게 운전하기 위한 압력/온도 한계곡선의 도출을 위하여 전산 프로그램을 개발하였다. 원자력발전소의 운전 중 냉각 및 가열시 냉각재의 온도와 용기의 내압 그리고 용기의 재질성분이 주어지면 용기의 벽면에 따른 응력확대계수와 파괴인성치를 계산하고 이들을 비교하여 가정된 결합이 성장하지 않도록 운전압력과 온도를 조정하여 원자로 운전의 지침으로 삼을 수 있다.

국내원전 중 가장 오래된 고리 1호기에 대한 압력/온도 한계곡선을 다양한 냉각 및 가열률에 따라 설정하였다. 이들을 서로 비교한 결과 냉각 시에는 고온부위에서, 가열시에는 저온부위에서 각각 냉각률 및 가열률에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또 수명연장과 관련하여 32 EFPY 에서의 한계곡선을 도출하였고 24 EFPY 에서의 곡선과 비교한 결과 저온부위는 거의 비슷하나 고온부위에서는 우측에 위치하므로 더욱 제한적으로 운전해야 됨을 확인할 수 있었다.

## 기호설명

$A$	유효흐름단면적 (ft <sup>2</sup> )
[CF]	화학인자
$D$	수력반경 (ft)
$E$	Young율 (ksi)
$K$	재료의 열전도계수 (btu/hr-ft <sup>2</sup> -°F)
$K_b$	굽힘에 의한 응력확대계수 (ksi √ in)

$K_{bm}$	막응력에 의한 응력확대계수 (ksi √ in)
$K_{IR}$	파괴인성치 (ksi √ in)
$K_{II}$	온도차이에 의한 응력확대계수 (ksi √ in)
$M_b$	굽힘응력계수 (√ in)
$M_m$	막응력계수 (√ in)
$M_t$	온도보정계수 (√ in)
$Q$	유량 (lb <sub>m</sub> /hr)
$RT_{NDT}$	기준무연성천이온도 (°F)
$RT_{NDT0}$	조사전의 $RT_{NDT}$ (°F)
$T$	용기벽의 온도 (°F)
$T_c$	냉각재의 온도 (°F)
$a$	내벽면으로부터의 길이 (in)
$c$	재료의 비열
$f$	중성자조사량 (10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup> , E > 1MeV)
$f_{surf}$	내벽에서의 조사량 (10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup> , E > 1 MeV)
$h$	냉각수와 용기사이의 열전달계수 (btu/hr-ft <sup>2</sup> -°F)
$k$	열확산계수 (ft <sup>2</sup> /hr)
$p$	내압 (ksi)
$r_o$	용기의 외경 (in)
$r_i$	용기의 내경 (in)
$v$	냉각재의 평균속도 (ft/hr)
$w$	원자로 용기의 두께 (in)
$\alpha$	열팽창계수 (ft/ft/°F)
$\rho$	밀도 (lbm/ft <sup>3</sup> )
$\sigma_b$	굽힘응력 (ksi)
$\sigma_m$	막응력 (ksi)
$\sigma_p$	압응력 (ksi)
$\sigma_T$	열응력 (ksi)

## 참 고 문 헌

1. Oezisik, M.N., *Heat Conduction*, John Wiley & Sons, 1980.
2. Myers, M.N., *Analytical Method in Conduction Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1971.
3. ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Appendix I, 1992.
4. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.M., *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill,

New York, 1970.

5. Harvey, J.F., *Theory and Design of Modern Pressure Vessels*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold Co., New Jersey, 1960.
6. ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Appendix G, 1992.
7. USNRC, "Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials," Regulatory Guide 1.99, Rev.2, US Nuclear Regulatory Commission, May 1988.

### 부록-재료의 물성치

본문에서 사용된 재료의 물성치인 열전도계수  $K$  (btu/hr-ft-°F), 열확산계수  $k$  (ft<sup>2</sup>/hr) 및 열팽창계수  $\alpha$ (ft/ft/°F)를 온도의 함수로 나타내면 다음과 같다.

SA508 Class 3 (3/4Ni-1/2Mo-Cr-V) :

$$K = 21.309 + .88517 \frac{T_{avg}}{10^2} - .19641 \frac{T_{avg}^2}{10^4} + .91496 \frac{T_{avg}^3}{10^8}$$

$$k = .43040 - 14836 \frac{T_{avg}}{10^5} - .45642 \frac{T_{avg}^2}{10^7} + .16109 \frac{T_{avg}^3}{10^{11}}$$

$$\alpha = 10^{-6} \left( 6.2996 + .18464 \frac{T_{avg}}{10^2} + .32482 \frac{T_{avg}^2}{10^7} - .44579 \frac{T_{avg}^3}{10^9} \right)$$

SA533B Class 1 (Mn-1/2Mo-1/2Ni) :

$$K = 21.303 + .16033 \frac{T_{avg}}{10^1} - .29469 \frac{T_{avg}^2}{10^4} + .12344 \frac{T_{avg}^3}{10^7}$$

$$k = .42549 + .68456 \frac{T_{avg}}{10^4} - .51640 \frac{T_{avg}^2}{10^6} + .28578 \frac{T_{avg}^3}{10^9}$$

$$\alpha = 10^{-6} \left( 6.8420 + .23285 \frac{T_{avg}}{10^2} + .14897 \frac{T_{avg}^2}{10^5} + .58824 \frac{T_{avg}^3}{10^9} \right)$$

(접수일자 : 1997. 3. 24)