

'99 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

**SMART 증기발생기 모듈급수관의 천이 열응력 해석**  
**Transient Thermal Stress Analysis for Module Feedwater Pipe of**  
**SMART Steam Generator**

김용완, 김지호, 박진석, 허형, 김종민

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

**요 약**

일체형원자로 SMART 노내에서 안팎의 온도차가 가장 큰 모듈급수관에 대한 천이 열응력해석을 수행하였다. 그린함수를 정의하여 임의의 천이하중이 가해질 때의 열응력을 효과적으로 계산할 수 있는 수식을 유도하였다. 냉각재 온도가 스텝함수로 변할 때의 응력을 시간의 함수로 구하고 이 값과 천이 온도를 Duhamel 적분함으로써 간단하게 천이 열응력을 구하였다. 그린함수는 선형시스템에만 적용할 수 있으므로 온도에 따라 변하는 물성치는 고려할 수 없다. 따라서 선형-열천이-유한요소해석과 온도에 따른 물성치 변화를 고려한 재료 비선형-열천이-유한요소해석을 ABAQUS로 수행하여 결과를 비교하였다. 그린함수법으로 계산한 결과와 선형-열천이-유한요소해석 결과가 잘 일치함을 보여 타당성을 입증하였으며 이는 향후 증기발생기의 피로해석에 유용하게 사용될 수 있다. 온도에 따른 물성치 변화를 고려한 재료 비선형해석은 선형해석결과와 약 20%정도의 차이를 보였다. 일체형 원자로 SMART의 기동운전 시의 열응력을 시간의 함수로 구하였으며, 운전 중에는 안팎의 온도 차로 인한 응력이 항복응력의 약 10%임을 알 수 있었다.

**Abstract**

A transient thermal stress analysis for the module feedwater pipe of the SMART steam generator was performed. An analytic equation to calculate the thermal transient stress was derived on the basis of Green function concept. The thermal transient stress of the module feedwater pipe subjected to an arbitrary change of the coolant temperature was obtained from the Duhamel integration for the product of the coolant temperature and the Green function. A transient finite element analysis was also carried out for the methodological justification and the quantitative comparison with the Green function method. The results of the linear transient finite element analysis have shown a good agreement with those of the Green function method. The results of transient finite analysis using temperature dependent nonlinear material properties have shown 20% difference with those by using constant material properties. During the start up of the integral reactor SMART, maximum thermal stress has reached up to 10% of the yield stress of the titanium alloy.

## 1. 서론

일체형원자로에는 증기발생기가 원자로에 내장된다. 한국 원자력연구소에서 개발 중인 일체형원자로 SMART의 경우에도 12개의 카세트형 증기발생기가 노심지지원통(core support barrel)과 원자로 내벽 사이에 위치하므로 원자로 압력용기에서 증기발생기 카세트의 모듈급수헤더(module feedwater header)까지 이차측 급수를 공급하여야 한다<sup>1,2</sup>. 원자로 안에는 310℃의 고온 냉각수가 있으며 이차측 급수는 정상상태에서 120℃로 공급된다. 따라서 원자로 전체에서 모듈급수관이 안팎의 온도차가 가장 크므로 열응력해석을 수행하여 구조적 건전성을 보장해야 한다. SMART의 경우에는 주냉각재펌프를 가동하여 온도를 상승시키는 대형상용원자로와 달리 핵연료의 반응열을 이용해서 기동(start up)하므로 단위 시간당 온도 상승이 커서 열응력에 대한 평가가 매우 중요하다.

배관에 대한 천이 열응력해석은 현재까지 다양한 형태로 많이 수행되어 왔다. 단순한 열하중에 대해서는 이론적인 해도 있으며, 최근에는 유한요소해석을 이용해서 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다<sup>3</sup>. 그러나 실제 현상에서 나타나는 복잡한 천이 열하중은 함수형태의 수식으로 나타낼 수가 없으므로 여러 가지 천이하중에 대한 해를 지속적으로 구하는 방법의 정립이 필요하다.

본 연구에서는 임의의 함수로 표시되는 천이하중에 대한 해를 이론적으로 구할 수 있는 수식을 유도하였으며 유한요소해석방법을 사용하여 천이 열응력 해석을 수행하였다. 또한, SMART 증기발생기의 모듈급수관에 대해 원자로의 기동 및 정지 시의 열응력을 계산하였다. 압력에 의한 응력성분은 시간과 무관하므로 단순하게 중첩하면 된다.

## 2. 열응력 해석

### 2.1 모듈급수관

SMART의 증기발생기는 전체가 내식성이 강한 티타늄합금으로 설계되었다. 모든 튜브와 관은 PT-7M으로 제작되었는데 온도에 따른 기계적성질 및 물성치는 표 1과 같다. 모듈급수관은 총 72개로 구성되며 내부는 저온의 이차측 냉각재가 흐르고 외부는 고온의 일차냉각재가 있다. 급수관은 원자로 상부에서 유입되어 6m이상의 모듈급수관을 지나므로 이 과정에서 부분적인 비등이 발생할 가능성이 있어 긴 직관 부위는 이중관으로 설계되어 있다. 본 연구에서는 첫 단계로 단일 관으로 설계된 부분을 모델링하여 열응력을 해석하였다. 모듈급수관의 외경은 35mm이며 두께는 4mm이다. 수식화 및 유한요소해석을 위한 좌표계 및 변수는 Fig.2와 같다.

### 2.2 그린함수법

그린함수는 통상적으로 단위 스텝 혹은 충격하중에 대한 시스템 응답을 의미한다. 준정적(quasi-static) 열탄성이론에서 응력분포는 온도분포의 유일함수임이 입증되었고 그린함수법이 연계(coupling)가 없는 열탄성 문제에 사용될 수 있음이 Boiley 등에 의해 논의되었다<sup>4</sup>. 이 때 열적, 기계적 성질이 열천이해석 동안 변하지 않는 것으로 가정하며 열천이하중에 의한 변형률의 속도가 응력파의 전파에 의한 변형률속도보다 훨씬 늦은 것으로 가정한다. 이러한 가정을 바탕으로 선형문제에서 경계에서의 입력하중이 시간에 따라 변할 때는 구조동력학에서 많이 사용되는 Duhamel의 정리가 효율적으로 사용될 수 있다. 원자력발전소의 실시간 감시시스템을 개발하기 위해서 배관에 작용

하는 모멘트를 그린함수로 정의하여 해석하였으며 이를 바탕으로 응력확대계수를 계산하는 방법도 개발한 바 있다<sup>56,7</sup>.

경계의 온도가 스텝하중  $H(t)$ 로 변했을 때의 시간에 따른  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ 방향의 응력을 그린함수로 다음과 같이 정의한다.

$$G_r(t) = [s_{rrq}]_{\Theta(t)=H(t)} \quad (1-a)$$

$$G_q(t) = [s_{qq}]_{\Theta(t)=H(t)} \quad (1-b)$$

$$G_z(t) = [s_{zzq}]_{\Theta(t)=H(t)} \quad (1-c)$$

경계온도가  $T_a(t)$ 가 임의로 변하는 경우의 해는 그린함수와 온도함수를 Duhamel적분을 함으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Theta(t) = T_a(t) - T_0 \quad (2)$$

$$s_{rr}(t) = \int_0^t G_r(t-t) \frac{d\Theta(t)}{dt} dt \quad (3-a)$$

$$s_{qq}(t) = \int_0^t G_q(t-t) \frac{d\Theta(t)}{dt} dt \quad (3-b)$$

$$s_{zz}(t) = \int_0^t G_z(t-t) \frac{d\Theta(t)}{dt} dt \quad (3-c)$$

계산의 편의를 위해 관의 원주방향 응력에 대한 표현을 다음과 같이 변경하였는데  $r$ ,  $z$  방향도 모두 같은 형태로 표현되므로 생략하였다.

$$s_{qq}(t) = \int_0^{t-t_d} G_q(t-t) \frac{d\Theta(t)}{dt} dt + \int_{t-t_d}^t G_q(t-t) \frac{d\Theta(t)}{dt} dt \quad (4)$$

여기서  $t_d$ 는 감소기간을 나타내며, 대부분의 탄성체에서 그린함수는 감소기간을 지나면 일정한 값에 도달하여 시간과 무관하게 된다. 수식(4)에서 우변 첫째 항은 명시적인 적분이 되어 다음과 같이  $n$ 개의 구간으로 나누어 표현할 수 있으므로 전체적인 적분이 간단해지고 수치적인 적분이 가능하다.

$$s_{qq}(t) = \sum_{i=1}^n G_q(t_d - t_i) \frac{\{\Theta(t_i) - \Theta(t_i - \Delta t)\}}{\Delta t} \Delta t + G_q(t_d) \{\Theta(t - t_d) - \Theta(0)\} \quad (5)$$

여기서

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i = t_d \quad (7)$$

### 2.3 원통관의 이론해

모듈급수관은 길이가 매우 긴 원통(cylinder)으로 간주할 수 있다. 모듈급수관의 온도분포가 결정되면 응력은 다음과 같이 표현된다<sup>8</sup>.

$$s_{rr} = \frac{E}{1-\nu} \left( -\frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r \Phi r dr + \frac{r^2 - R_i^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_o} \Phi r dr \right) \quad (8-a)$$

$$\mathbf{s}_{qq} = \frac{E}{1-n} \left( \frac{1}{r^2} \int_{R_i}^r \Phi r dr + \frac{r^2 + R_i^2}{r^2(R_o^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_o} \Phi r dr - \Phi \right) \quad (8-b)$$

$$\mathbf{s}_{zz} = \frac{E}{1-n} \left( (1-n) \mathbf{e}_{zz} - \Phi + \frac{2n}{(R_o^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_o} \Phi r dr \right) \quad (8-c)$$

여기서

$$\Phi = \int_{T_o}^{T'} \mathbf{a}(T') dT'$$

원통의 내벽이 갑자기  $\Delta\theta$ 의 크기를 갖는 스텝함수로 변하는 열충격을 받을 때 응력은 다음과 같이 구할 수 있다. 수식 (8-b)와 온도분포해<sup>8</sup>를 이용하여 원통에서 가장 중요한 원주방향 대한 응력은 다음과 같이 시간과 무관한 정상상태 열응력 값과 시간의 함수로 표시되는 천이상태 열응력 값으로 구분하여 구해진다.

$$\mathbf{s}_{qq}(r, t) = \mathbf{s}_{qq}^s(r) + \mathbf{s}_{qq}^t(r, t) \quad (9)$$

$$\mathbf{s}_{qq}^s(r) = \frac{Ea\Delta\theta}{(1-n)2\ln\left(\frac{R_i}{R_o}\right)} \left[ 1 + \ln\left(\frac{r}{R_o}\right) + \frac{\left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2 \ln\left(\frac{R_i}{R_o}\right)}{1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2} \left\{ 1 + \left(\frac{R_o}{r}\right)^2 \right\} \right] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{qq}^t(r, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Ea\Delta\theta}{1-\nu} \exp\left\{-I_n^2 R_i^2 \left(\frac{kt}{R_i^2}\right)\right\} \frac{\rho J_o^2(I_n R_o)}{J_o^2(I_n R_o) - J_o^2(I_n R_i)} \\ & \times \left[ \frac{R_o}{I_n r^2} \left\{ \frac{r^2 - R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right\} \left[ F_1(I_n R_o) - \left(\frac{R_i}{R_o}\right) F_1(I_n R_i) \right] + \frac{1}{I_n r} \left[ F_1(I_n r) - \left(\frac{R_i}{r}\right) F_1(I_n R_i) \right] - F_0(I_n R_i) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$F_0(I_n r) = Y_0(I_n R_i) J_0(I_n r) - J_0(I_n R_i) Y_0(I_n r) \quad (12)$$

$$F_1(I_n r) = Y_0(I_n R_i) J_1(I_n r) - J_0(I_n R_i) Y_1(I_n r) \quad (13)$$

위의 식에서  $\lambda_n$ 은 아래의 특성방정식 해이며  $J$ 와  $Y$ 는 각각 Bessel함수 및 Neuman함수이다.

$$J_0(I_n R_o) Y_0(I_n R_i) - J_0(I_n R_i) Y_0(I_n R_o) = 0 \quad (14)$$

윗 첨자  $s$ 는 정상상태(steady state)를 의미하며  $t$ 는 시간의 함수로 표현되는 천이상태(transient state)를 의미한다. 관의 내벽에서 임의의 천이 열충이 하중이 가해지는 경우의 응력 값은 수식(3-b)와 수식(11)을 사용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{qq}^t(r, t) = & \int_0^t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Ea}{1-\nu} \exp\left\{-I_n^2 R_i^2 \left(\frac{\mathbf{k}(t-t)}{R_i^2}\right)\right\} \frac{\rho J_o^2(I_n R_o)}{J_o^2(I_n R_o) - J_o^2(I_n R_i)} \\ & \times \left[ \frac{R_o}{I_n r^2} \left\{ \frac{r^2 - R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right\} \left[ F_1(I_n R_o) - \left(\frac{R_i}{R_o}\right) F_1(I_n R_i) \right] \right] \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{I_n r} \left\{ F_1(I_n r) - \left( \frac{R_i}{r} \right) F_1(I_n R_i) \right\} - F_0(I_n R_i) \left] \frac{d\Theta(t)}{dt} dt \quad (15)$$

수식(15)를 이용하여 모듈급수관 내의 이차축 온도가 임의로 변하는 경우에 대한 응력을 계산할 수 있으며 유사한 방법으로  $r$ ,  $z$ 방향의 응력성분을 구할 수 있다.

## 2.4 유한요소해석모델

이론적으로 해를 구하기 힘든 경우에는 유한요소해석을 사용하여 그린함수를 구하고 Duhamel적분을 수치적으로 수행하여 냉각재의 온도가 임의로 변할 때 야기되는 응력값을 구할 수 있다. 유한요소해석은 ABAQUS<sup>9</sup>에서 축대칭요소를 사용하여 수행하였다. 모든 물성치가 일정하다고 가정하고 단위 스텝함수로 온도변화를 입력하여 그린함수를 구하였다. 그리고 방법적인 비교를 위해서 경계에서의 천의온도를 입력하여 물성치가 일정하다는 가정하에서 선형으로 천이 열응력 해석을 수행하였다. 실제로는 상온에서 운전온도까지 물성치 변화가 크다. 열전달계수, 탄성계수, 열팽창계수 등이 온도의 함수로 변하므로 이 것을 고려하여 재료비선형유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 수행할 때 축 방향의 경계에서 절점의  $z$ 방향 변위가 같다는 조건을 가하여 모듈급수관을 묘사하였다. 열응력 해석은 경계의 온도분포를 입력하여 구조물의 온도를 구한 다음 이를 하중조건으로 다시 응력해석을 수행하였다. 시간의 증분을 다양하게 변화시키면서 해석을 수행해본 결과 그린함수를 구할 때는 0.03초의 간격으로 계산하면 적절하였으며 기동운전에 대한 천이유한요소해석은 시간증분을 3초로 계산하였다.

## 3. 결과 및 분석

일차냉각수가 단위 스텝함수로 변하고 이차냉각재는 일정온도를 유지할 때 모듈급수관의 안쪽 면과 바깥쪽 면에서의 열응력은 Fig.3와 같다. 이 경우 약 100 초가 경과하면 응력은 정상상태를 유지함을 보였다. 이차냉각재가 단위 스텝함수로 변할 때 모듈급수관의 안쪽 면과 바깥쪽 면에서의 열응력 변화는 Fig.4와 같다. 이 값을 이용하여 수치 적분하면 임의의 열천이 하중에 대한 응력 분포를 구할 수 있다.

원자료가 기동할 때의 온도분포 및 이 때의 열전달계수(convection coefficient)는 Fig.5와 같다. 기동할 때의 온도분포를 입력하여 계산한 결과 모듈급수관 안쪽 면의 열응력 변화는 Fig.6과 같으며, 바깥쪽 면의 열응력 변화는 Fig.7과 같다. 그린함수를 온도와 함께 적분하여 구한 결과와 선형유한요소해석으로 구한 결과는 거의 일치함을 보여 그린함수로 용이하게 구하는 방법의 타당성을 보여준다. 한편 물성치를 온도의 함수로 입력하여 재료 비선형-열천이-유한요소해석을 수행하면 선형해석 결과와는 약 20%의 차이를 보인다. 또한, 두께방향으로 원주방향 응력분포는 Fig.8과 같으며 반경방향 응력분포는 Fig.9와 같다. 축방향( $z$ 방향)의 응력분포는 원주방향의 온도분포와 유사하였다.

정상상태에서 일차축 압력은 15MPa이며 이차축압력은 3MPa이므로 모듈급수관에는 압력으로 인한 압축응력이 작용한다. 정상운전 중에 모듈급수관의 바깥면에 압축 열응력이 생기므로 압력에 의한 응력과 중첩되어 가장 큰 응력이 작용하게 된다. 반경반향의 열응력은 중앙에서 가장 큰 값을 보이지만 절대값이 작으므로 모듈급수관의 강도에는 큰 영향을 미치지 않는다.

## 4. 결론

그린함수를 정의하여 냉각재 온도가 임의로 변할 때의 열응력을 효과적으로 계산할 수 있는 수

식을 유도하고 일체형원자로에서 안팎의 온도차가 가장 큰 모듈급수관에 대한 천이 열응력해석을 수행하였다. 그린함수법으로 계산한 결과와 선형-열천이-유한요소해석결과가 잘 일치함을 보여 방법적 타당성을 입증하였으며 이는 향후 증기발생기의 피로해석에 유용하게 사용될 수 있다. 정량적인 비교를 위하여 재료 비선형-열천이-유한요소해석방법으로 온도에 따른 물성치 변화와 열전달계수 변화를 고려한 해석을 수행하였다. 재료 비선형-열천이-유한요소해석결과는 선형해석결과와 약 20%정도의 차이를 보였다. 일체형 원자로 SMART의 기동운전 시에 증기발생기 모듈급수관에 작용하는 열응력을 시간의 함수로 구하였으며, 운전 중에는 안팎의 온도차로 인한 응력이 항복응력의 약 10% 임을 알 수 있었다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김종인, 일체형원자로 주기기 개발, *기계저널* 제39권, 제4호, 1999, pp.50-55.
2. 김종인 외, *일체형원자로 기기개발 및 검증시험 과제 1단계 최종보고서*, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1889/98, 1999.
3. Naotake Noda, *Thermal Stresses Volume I*, Elsevier Science Publishers, Edited by R.B. Hetnarsk, 1986, pp.392-483.
4. B.A. Boilely and J.H. Weiner, *Theory of Thermal Stress*, John-Wiley, NewYork, 1960.
5. A.Y. Kuo, S.S. Tang, and P.C. Riccardella, "On-line Fatigue Monitoring Systems for Power Plants : Part 1 - Direct Calculation of Transients Peak Stress Through Transfer Matrices and Green's Function," *ASME PVP-Conference*, Chicago, USA, 1986.
6. Y.W. Kim, J.H. Lee, B. Yoo, "An Analysis of Stress Intensity Factor for Thermal Transient Problems Based on Green's Function," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.49, No.3 pp.393-403, 1994.
7. 구경희, 김용완 외, "원자력발전소 실시간 피로손상 감시시스템 개발 및 적용," *한국원자력학회'94 춘계학술대회 논문집*, 1994
8. H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, 1950.
9. HKS, ABAQUS, *User's Manual*, Version 5.8, 1998.

Table 1 PT-7M 티타늄 합금의 온도에 따른 기계적성질.

온도(°C)	물성치	열전도도 W/m°C	항복응력 MPa	탄성계수 GPa	열팽창계수 x10 <sup>-6</sup>
20		10.17	372	112	8.5
100		11.63	279	106	8.8
200		13.08	211	100	8.9
300		14.53	186	93	9.2
350		15.26	181	89	9.2

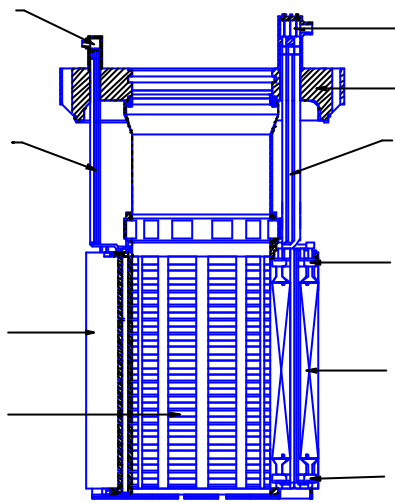


Fig. 1 Steam generator assembly of integral reactor SMART.

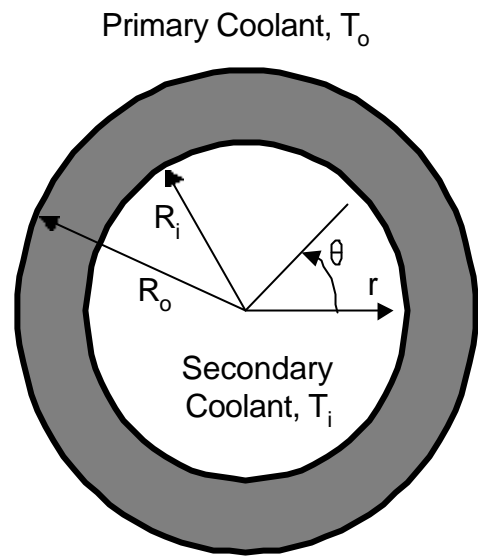


Fig. 2 Explanation of coordinate system and variables

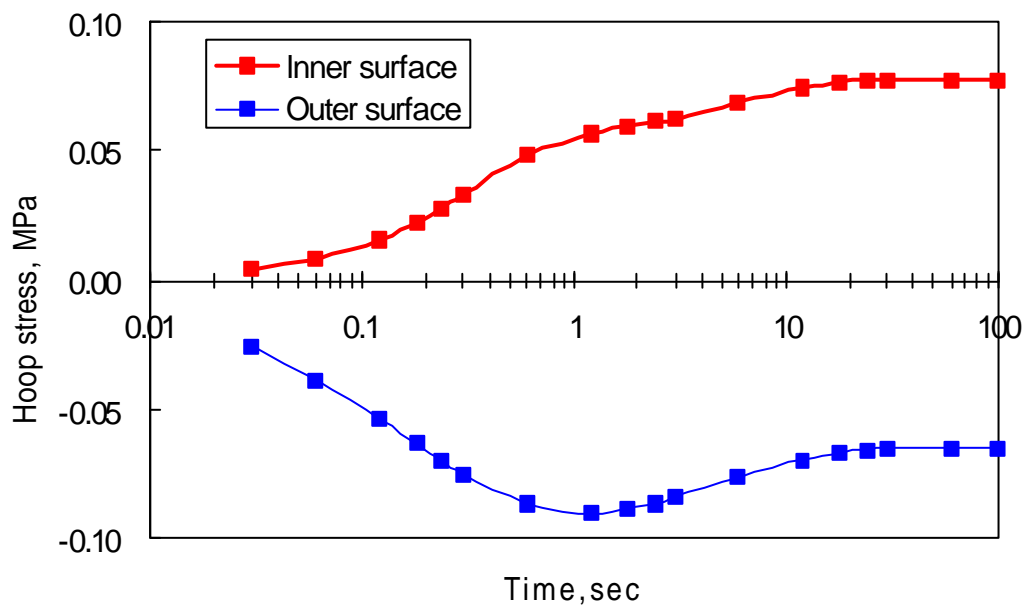


Fig. 3 Change of hoop stress after a step change of primary coolant.

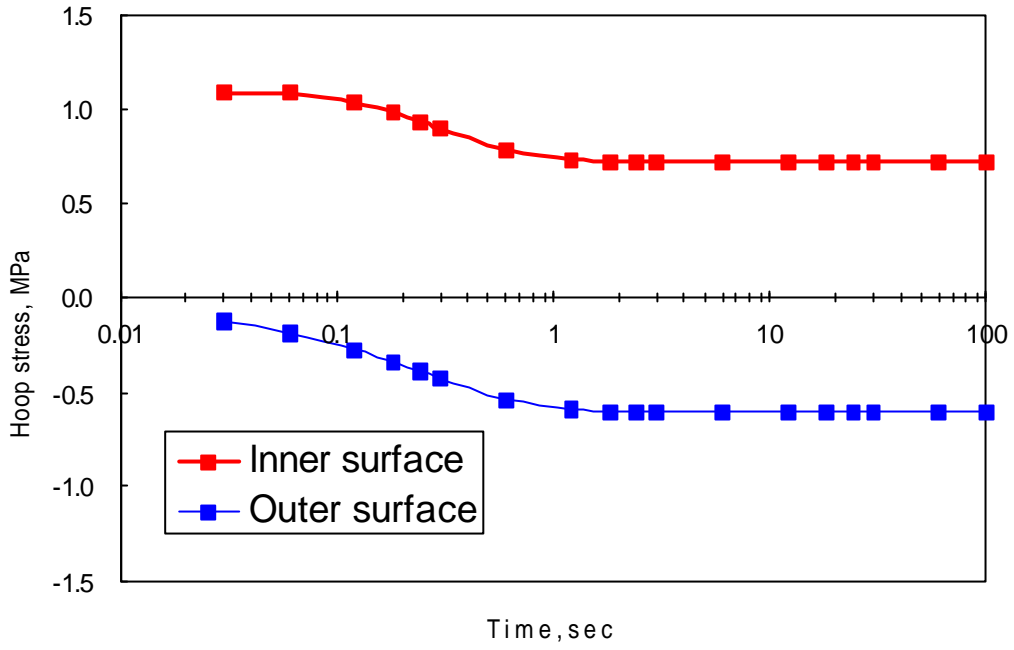


Fig. 4 Change of hoop stress after a step change of secondary coolant.

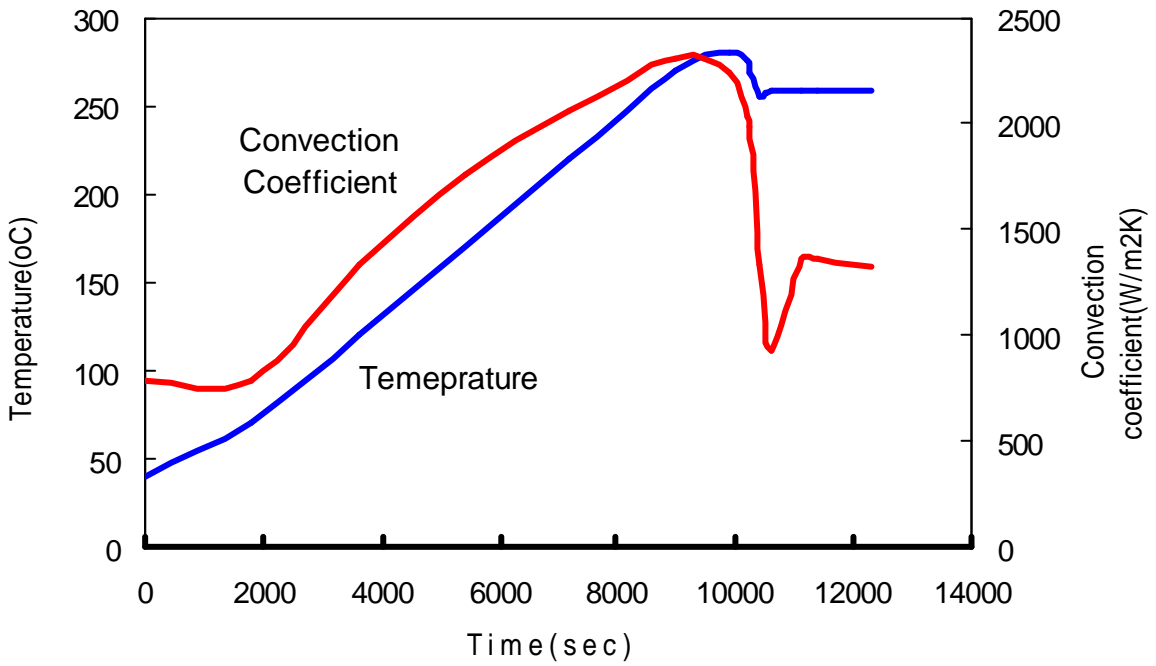


Fig. 5 Temperature and convection coefficient change during the start up of the reactor.



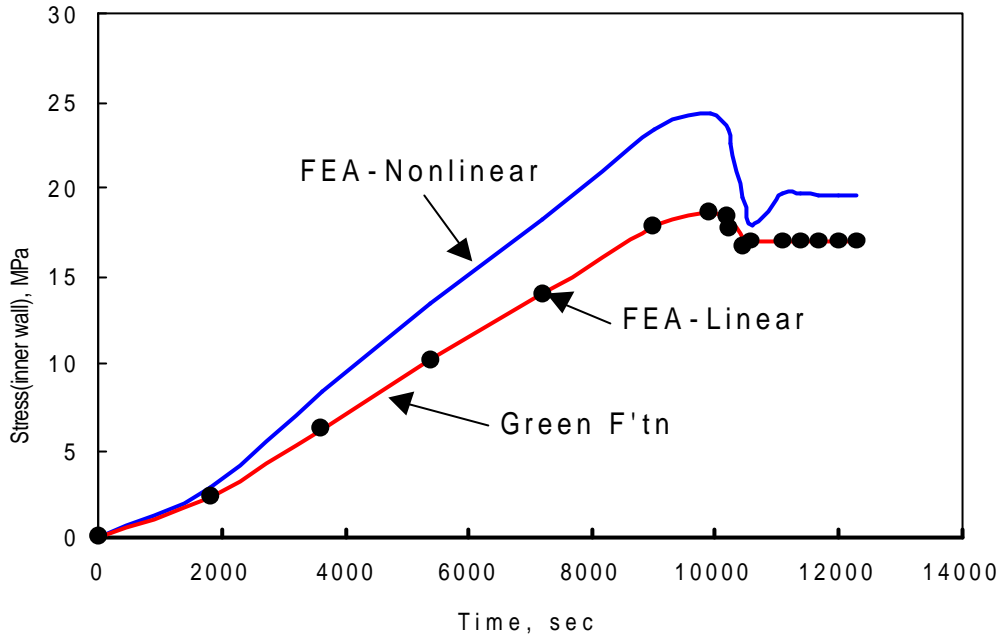


Fig. 6 Change of hoop stress at the inner wall of module FW pipe during start up of the reactor.

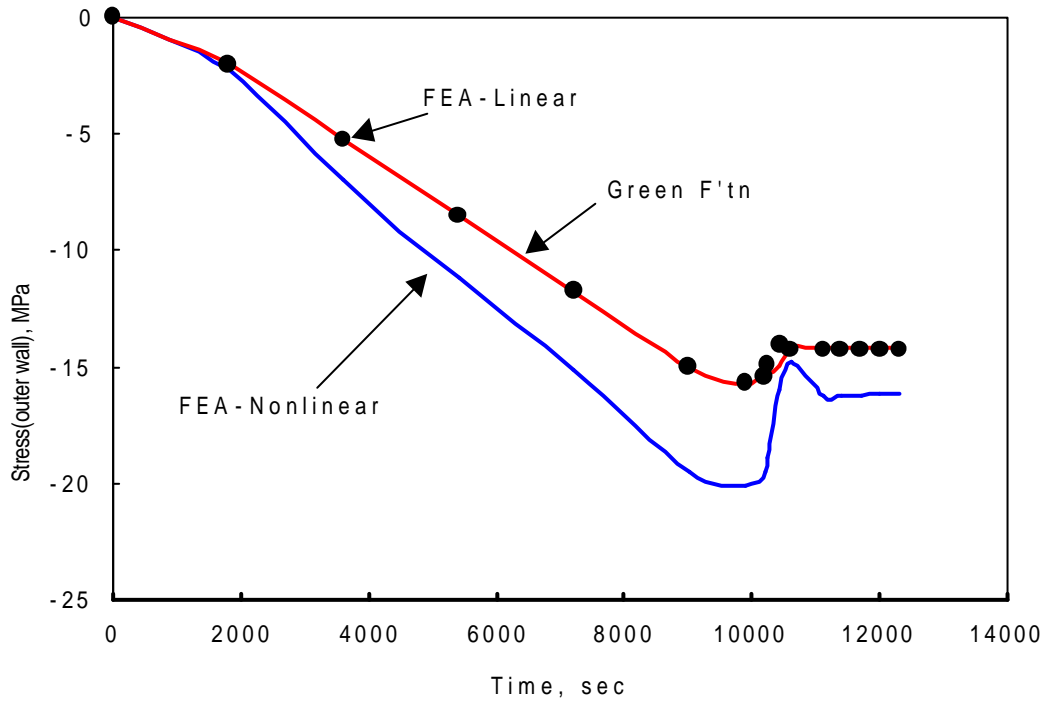


Fig. 7 Change of hoop stress at the outer wall of module FW pipe during start up of the reactor.

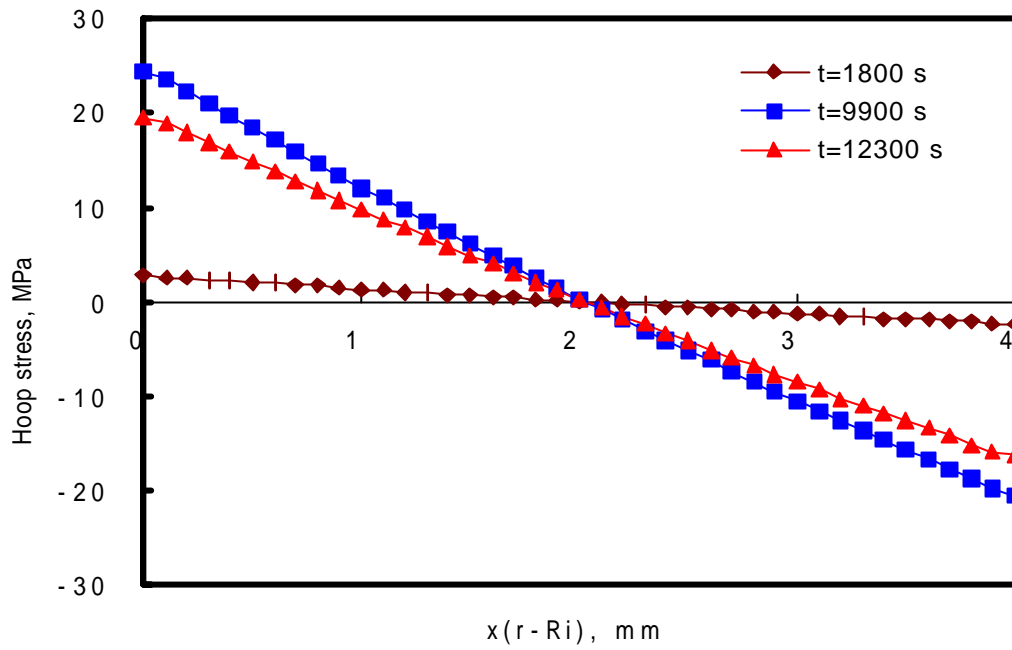


Fig. 8 Hoop stress distribution along the thickness during start up of the reactor.

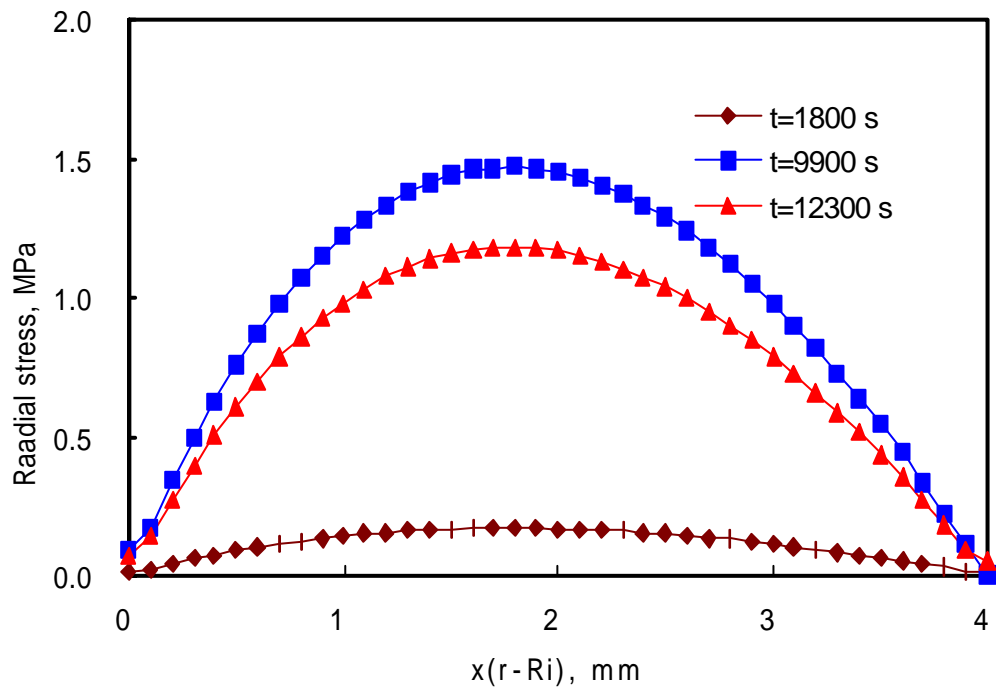


Fig. 9 Radial stress distribution along the thickness during start up of the reactor.