

〈논 문〉

가압기밀림관의 수평배관내 열성층유동

정일석* · 김 유** · 염학기*** · 박만흥***

(1995년 8월 11일접수)

Thermal Stratification in a Horizontal Pipe of Pressurizer Surge Line

I. S. Jung, Y. Kim, H. K. Youm and M. H. Park

Key Words: Thermal Stratification(열성층), Surge Line(밀림관), Control Volume Formulation(제어체적방법), Unsteady State (비정상 상태)

Abstract

In this paper, the unsteady two dimensional model for the thermal stratification in the pressurizer surge line of PWR plant has been proposed to numerically investigate the heat transfer and flow characteristics. The dimensionless governing equations are solved by using the Control Volume Formulation and SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algorithm. The temperature profile of fluids and pipe wall with time are shown when the thermal stratification occurs in the horizontal pipe. The numerical result shows that the maximum dimensionless temperature difference is about 0.514 between hot and cold section of pipe wall at dimensionless time 1,632.

기 호 설 명		
a	: 배관의 두께	Re : Reynolds 수
Bi	: Biot 수	Ri : Richardson 수
C_1, C_2	: 확산계수	T : 온도
C_p	: 정압비열	t : 시간
E	: 탄성계수	U_0 : 기준속도
g	: 중력가속도	u, v : 속도
Gr	: Grashof 수	α : 열확산계수
h	: 열전달계수	β : 열팽창계수
k	: 열전도계수	θ : 원주방향 및 각도
\dot{m}	: 질량유량	ϕ : 종속변수
Nu	: Nusselt 수	σ : 응력
P	: 압력	상첨자
Pr	: Prandtl 수	m : 막(membrane) 및 반복횟수
r	: 반경방향	$*$: 유차원값
		$-$: 평균값
		하첨자
		b : 굽힘(bending)

*충남대학교 대학원 기계공학과

**회원, 충남대학교 기계공학과

***회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

- f, s : 유체 및 고체영역
- HL : 고온관
- $hot, cold$: 고온 및 저온
- i, o : 내부 및 외부
- $p_z r$: 가압기
- ∞ : 주변대기

1. 서 론

원자력발전소의 시운전(startup operating) 및 고온대기운전(hot stand-by operating) 등과 같은 천이 운전시에 주급수계통 및 원자로 냉각재계통과 연결된 수평배관들에 대한 온도 측정결과, 고온유체와 저온유체가 층을 이루어 존재하는 열성층현상이 존재하며, 이것이 배관의 설계시 고려하지 않았던 열응력을 발생시키는 것으로 보고되었다.

이에 따라 미국의 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 기존의 원전뿐만 아니라 설계 중인 원전에 대해서 이와 같은 배관들을 대상으로 열성층현상의 존재여부 검토 및 해석을 수행하여 배관의 건전성을 확인 및 확보하도록 NRC bulletin 88-08⁽¹⁾에 고시하였고 특히 가압기 밀림관에서의 열성층현상에 대한 문제점을 NRC bulletin 88-11⁽²⁾에 보고하였다. 이러한 열성층현상에 의해서 발생된 응력을 기존의 배관설계시, 배관에 작용하는 열하중에 포함시키지 않았으나, 최근의 실험 및 해석연구 결과^(3,4,5,6)들에 의하면 열성층현상에 의한 열응력이 배관의 균열 및 배관지지대에 많은 하중으로 작용하여 불필요한 변위를 발생시키는 주요원인으로 판명되었다.

열성층현상과 관련된 대부분의 해석방법들은 배관에서 최대 열응력을 발생시킬 것으로 예상되는 유체 및 배관의 온도분포를 간단한 1차원모델 및 가정들을 적용하여, 열성층현상 발생에 따른 배관의 응력해석을 수행하였을 뿐이며, 유체 및 배관의 정확한 유동장 및 온도분포를 얻기 위한 해석연구 및 시간에 따른 유체 및 배관의 온도변화 및 유동에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 원자력발전소의 천이운전중에 가압기에서 가열된 냉각재가 상대적으로 저온유체로 채워진 밀림관(surge line)으로 유입되어 시간에 따라 고온유체의 수위가 배관상부로부터 점차 하강하여 배관의 중앙부근까지 변화하며 수평배관내에

서 열성층현상이 발생하는 경우, 시간변화에 따른 배관 및 유체의 유동, 온도분포 및 이에 따른 열응력분포를 구하고자 한다.

2. 이론해석

본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같은 가압기 밀림관 수평배관 부분에서 발생하는 열성층현상에 대한 비정상 2차원 열유동해석을 수행하기 위하여 수평배관 원형단면의 반경 및 원주방향을 r 및 θ 좌표로 선정한 원통좌표계를 Fig. 1(b)에 나타내었다.

수평배관내에서 두 유체의 온도차에 의해 발생하는 열성층현상을 해석하기 위해서, 물리적인 현상

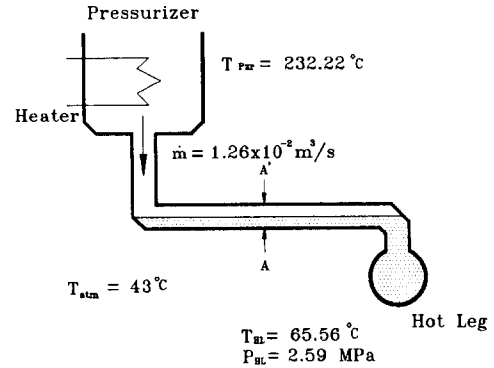


Fig. 1(a) The heatup condition of pressurizer surge line

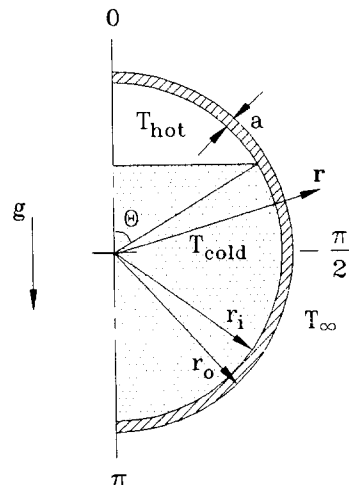


Fig. 1(b) Schematic diagram of the calculation domain

을 나타내는 지배방정식들을 다음과 같은 가정들을 적용함으로써 단순화하였다.

○ 고온 및 저온유체는 비정상상태 2차원 유동이다.

○ 온도차에 의한 유체의 밀도변화는 중력항에서만 존재하며, 그 이외에는 유체 및 배관의 모든 물성치들은 일정하다.

○ 유체의 압축성효과, 점성소산 및 복사열전달은 무시한다.

○ 고온 및 저온유체 사이의 경계면의 두께(혼합영역)는 무시할 정도로 작다.

○ 저온유체로 채워진 배관내에 일정한 유량의 고온유체가 배관상부로 유입되어 형성되는 열성층 경계면의 위치는 시간에 따라 변화하지만 열성층 경계면이 일정한 위치($\theta = \pi/2$)에 도달하면 경계면은 더 이상 변화하지 않는다.

주어진 가정에 따라 채택된 모델의 유체 및 배관에 대한 원통좌표계의 지배방정식에서 일반성 있는 해를 얻기 위하여 정의한 무차원 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r &= \frac{r^*}{r_i^*}, \quad a = \frac{(r_0^* - r_i^*)}{r_i^*}, \quad v = \frac{v^*}{U_0}, \quad u = \frac{u^*}{U_0} \\ t &= \frac{t^* U_0}{r_i^*}, \quad T = \frac{T^* - T_{cold}^*}{T_{hot}^* - T_{cold}^*}, \quad P = \frac{P^*}{\rho_0 U_0^2} \\ Pr &= \frac{Cp\mu}{k}, \quad Re = \frac{U_0 r_i^*}{\nu} \\ Gr &= \frac{g\beta r_i^{*3} (T_{hot}^* - T_{cold}^*)}{\nu^2}, \quad Bi = \frac{h(r_0^* - r_i^*)}{k_s} \\ a_s &= \frac{k_s}{\rho_s Cp_s} \\ a_r &= \frac{k}{\rho_0 Cp}, \quad P^* = p^* + \rho_0 g r^* \cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

기준속도 U_0 는 수평배관 길이 방향의 가압기밀림관으로 유입되는 고온유체의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 유동이 2차원이라고 가정하였지만 고온 유체의 유입속도에 따라 유동형태가 변화하고, 또한 열성층 현상의 판정기준인 Ri 수($=Gr/Re^2$)가 무차원 지배방정식에서 나타날 수 있도록 하기 위해서 U_0 를 기준속도로 선정하여 무차원 지배방정식에 반영하였다.

무차원변수를 적용하여 구한 무차원 지배방정식들은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (u) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ruv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (u^2) \\ &= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + C_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{u}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right\} - \frac{uv}{r} - \frac{Gr}{Re^2} T \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (uv) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + C_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \right. \\ & \quad \left. - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right\} + \frac{u^2}{r} + \frac{Gr}{Re^2} T \cos\theta \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvT) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (uT) \\ &= C_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서의 계산 모델은 유체 및 고체영역이 동시에 존재하므로 지배방정식에서의 각 영역에 대한 확산계수 C_1 및 C_2 는 운동량 및 에너지방정식에서 각각 다음과 같이 나타난다.

$$C_1 = \begin{cases} \frac{1}{Re} & \text{at fluid} \\ \infty & \text{at solid} \end{cases} \quad (6)$$

$$C_2 = \begin{cases} \frac{1}{PrRe} & \text{at fluid} \\ \frac{a_s/a_r}{Pr/Re} & \text{at solid} \end{cases} \quad (7)$$

무차원화된 초기 및 경계조건은 아래와 같다.

- 초기조건 ($t=0$)

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq 1+a, \quad 0 \leq \theta \leq \pi; \\ u = v = 0, \quad T = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

- 경계조건 ($t>0$)

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq 1+a; \\ \theta = 0, \pi \quad u = \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq \theta \leq \pi; \\ 1 \leq r \leq 1+a \quad u = v = 0 \\ r = 1+a \quad \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{Bi(T_0 - T_\infty)}{a} \end{aligned} \quad (10)$$

3. 수치해석방법

본 연구에서는 제어체적방법(control volume formulation)을 적용하였으며, 이산화방정식은 열전달 및 유동해석에 널리 사용되고 있는 SIMPLE

(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘과 선순법(line-by-line method)을 이용한 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 적용하는 기존의 수치해석 방법(7)을 사용하였다.

계산에 적용할 격자수 및 시간간격에 대한 최적의 값을 구하기 위하여 여러 가지 격자수 및 시간간격들을 선정하여 예비계산을 수행하였다. Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)에 각각 나타낸 바와 같이 계산된 평균 Nusselt 수를 검토하여, 여러가지 값의 변화 중에서 가장 큰 값을 기준으로 하여 평균 Nusselt 수가 크게 차이가 나지 않는 범위내에서 수치계산 시간 등을 고려하여 최적의 무차원 시간간격은

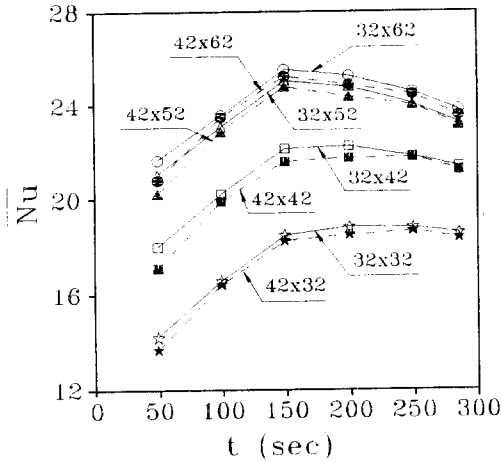


Fig. 2(a) Effect of grid size of predictions

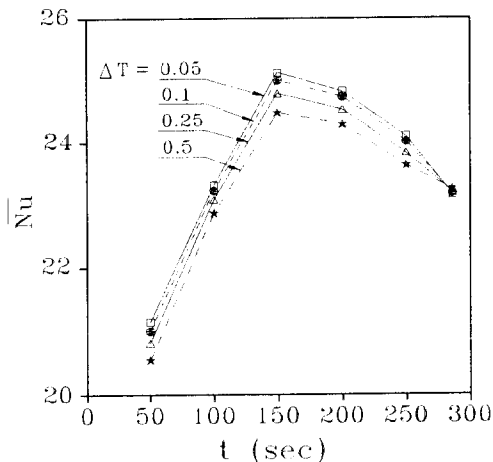


Fig. 2(b) Effect of time step of predictions

0.25, 격자수는 $r \times \theta$ 방향으로 52×32 로 결정하였다.

Fig. 3에는 본 수치계산에 적용된 수평배관단면의 격자배치를 각각 나타내었다. θ -좌표는 고온유체가 수평배관으로 유입되는 경우를 해석하기 때문에 배관의 상단부로 갈수록 세밀하게 배치하였다. r -좌표는 배관의 중심부보다는 배관벽면의 근처부분에서 유동현상 및 배관벽에서의 온도분포가 관심의 대상이므로 배관벽면을 가장 세밀하게 격자를 배치하였고 유체영역은 세 부분으로 나누어 각 부분은 등간격이지만 배관벽면으로 가까워질수록 더욱 세밀하게 배치하였다.

비선형 미분방정식들을 반복계산할 때 수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위해서 하향 이완계수를 사용하였다. 해의 수렴은 1회 반복 계산마다 열평형을 조사하여 오차가 0.01 % 이하이고, 식 (11)과 같이 각 변수들의 오차가 다음과 같은 허용범위 이내로 계산되면 수렴한 것으로 판정하였다.

$$\left| \frac{\phi^{m+1} - \phi^m}{\phi^m} \right| < 10^{-3} \quad (11)$$

여기서, 종속변수 ϕ 는 속도 및 온도를 나타낸다. 각 시간간격에서의 반복횟수는 초기에 약 200회 정도의 반복계산후에 수렴되었고, 시간이 지남에 따라서 반복횟수는 점점 감소하였으며, 정상상태와 가까워지면 10회 이하에서 수렴되었다. 계산

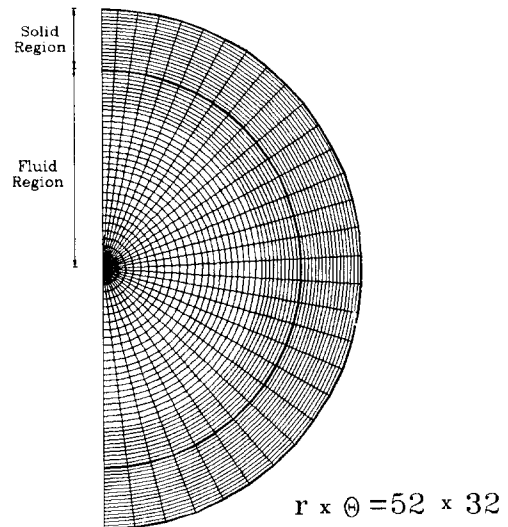


Fig. 3 Grid system of calculation domain

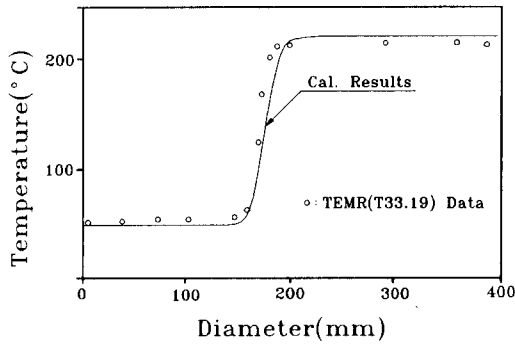


Fig. 4 The comparison between our result and HDR-experiment⁽⁵⁾

에 사용된 컴퓨터는 IBM-486 PC(66 MHz) 호환기종으로 본 해석모델을 무차원시간 24,000까지 계산하는데 약 200시간 정도 소요되었다.

수치해석 프로그램을 검증하기 위해서, HDR-Facility의 열성층현상 실험⁽⁵⁾에서 온도분포 측정결과와 본 프로그램의 모델을 적용한 계산결과를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 경계면 부근의 온도 분포가 약간의 차이를 나타내지만 온도분포들이 전체적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며 이를 바탕으로 본계산을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

가압경수로형 원자력발전소 가열(heatup)시에 가압기 밀림관의 양단 온도차가 가장 크게 나타나며, 이때 가압기측에 있는 약 232 °C의 고온유체가 약 66 °C의 저온유체로 채워져 있는 수평배관의 상단부로 천천히 유입되기 시작한다. 이러한 경우에는 고온유체와 저온유체는 수평배관내에서 서로 섞이지 않고 고온유체는 배관 상단부에 존재하고, 상대적으로 온도가 낮은 저온유체는 배관의 하단부로 분리된다. 정체된 저온유체로 유입되는 고온유체의 유량은 약 $1.26 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 가압기밀림관 수평배관의 사양 및 물성치는 Table 1과 같다. 수평배관 주위의 공기온도는 43 °C로 일정하다고 가정하였고, Table 1에서의 열전달계수는 배관외부에 단열재가 설치되어 있는 경우에 배관단열재 외부와 공기 사이의 설계허용 열전달계수이다.

무차원 지배방정식 및 경계조건에 나타난 수평배관내 열성층유동 현상을 지배하는 무차원수는 Gr ,

Table 1 Design specification of surge line^(9,10)

Properties & Spec.	Value
O. D of pipe	0.305 m
Thickness of pipe	0.036 m
Material of pipe	SA-762-TP-316
Conductivity	15.4 W/m°C
Heat transfer coef.	0.79 W/m ² °C
Ambient temp.	43 °C

Table 2 Dimensionless numbers at a given conditions

Dimensionless No.	Value
Gr	1.938×10^{10}
Re	1.199×10^5
Pr	1.1712
Bi	1.87×10^{-3}
Ri	1.35
T_∞	-9.94×10^{-2}
a	0.31
α_s/α_f	22.2
k_s/k_f	22.65

Re , Pr 및 Bi 등이며 발전소 가열시 조건을 대입하여 구한 무차원수 및 계산에 사용된 관련 변수들의 값을 Table 2에 나타내었다. 이러한 열성층현상은 무차원수인 Ri 수의 값에 따라 주어진 조건에서의 발생여부를 판별하며, Ri 수는 부력에 의한 자연대류영향을 나타내는 무차원수인 Gr 수 및 유동속도에 의한 관성력을 나타내는 무차원수인 Re 수의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ri = \frac{g\beta\Delta T^* r_i^*}{(u_{hot}^* - u_{cold}^*)^2} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (12)$$

열성층유동이 일어나는 최소한의 Ri 수는 0 이상이며, 유체가 열적으로 안정된 성층화가 되기 위한 Ri 수는 1 이상이다. 열성층현상 발생조건을 Re 수에 따른 실험결과⁽⁸⁾를 살펴보면 수평배관에서 열성층현상의 발생기준은 다음과 같다.

$$Ri \geq \left(\frac{Re}{10^3}\right) \quad \text{at } Re \leq 10^3 \quad (13)$$

$$Ri \geq 1 \quad \text{at } Re \geq 10^3 \quad (14)$$

계산된 Re 및 Ri 를 실험결과와 비교하여 보면 Re 는 10^3 보다 크고 Ri 수가 1보다 크기 때문에 주어진 조건에서는 열성층현상이 발생된다고 판단할 수 있다.

4.1 유동 및 온도분포

주어진 가정에 따라 발생한 열성층현상을 수치해석한 등온선 및 유선분포의 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 우측 반원은 유동분포를 나타내며 좌측 반원은 등온선 분포를 나타내는데, 등온선 분포의 최대값, 최소값 및 각 변수의 간격을 나타내는 표시로 [최대값 (간격) 최소값] 형태의 기호로 나타낸다.

Fig. 5의 (a), (b) 및 (c)는 초기에 저온유체로 채워진 수평배관내부에 고온유체가 유입되기 시작하여 무차원시간 25.0인 시점, 열성층 경계면이 배관 상단부에서부터 수평배관 단면적의 절반위치 ($\pi/2$)까지 수위가 도달한 무차원시간 88.25인 시점 및 초기의 고온유체가 유입된 후 무차원시간 150.0이 경과한 시점에서의 온도 및 유동분포를 나

타낸다. 등온선분포를 살펴보면 고온유체가 배관내부로 유입되는 시점부터 무차원시간 88.25까지의 시간 동안에는 유체영역내에서는 고온유체와 저온유체가 접촉하는 경계면에서 등온선이 집중되고 있으며, 배관상단부 벽면에서는 유입되는 고온유체의 영향으로 단지 내벽근처에서만 등온선이 나타난다. 그리고 무차원시간이 150.0 정도 경과한 후에는 상단부의 배관벽면에서는 배관내벽과 외벽 사이의 온도차가 점차 크게 나타나기 시작한다. 배관상단부에서는 배관벽과 유체 사이의 온도차가 크고, 배관외부가 단열재로 처리되어 있어 배관외부로의 열방출량 보다 유체에서 배관벽으로의 열전달량이 많기 때문에 배관벽 상단부에서는 배관벽을 따라 등온선이 경사지게 나타나지만, 하단부에서는 아직 고온유체의 영향이 나타나지 않는다. 유선분포는 고온유체가 유입되는 배관의 상단부에서만 집중적으로 유동이 존재하다가 고온유체의 수위가 배관의 절반위치에 도달하면 배관 단면적 전체에서 유동이 나타난다. 이는 초기에 고온유체가 아주 서서히 배관내부로 유입되어 유동영향이 배관하부까지 미치지 못하지만 수위가 절반에 이르면 배관상부의 유동 및 열전달 영향이 배관하부의 정체된 저온유체에 까지 미치기 때문이다.

Fig. 5의 (d), (e) 및 (f)는 무차원시간이 각각 750, 1500 및 2250를 경과한 후의 유동 및 등온선 분포를 나타낸다. 유체영역내에서는 초기에 배관상부로 고온유체가 계속적으로 유입되기 때문에 고온 및 저온유체의 접촉면 부근에 집중되어 있던 등온선들이 시간이 경과함에 따라 자연대류 열전달로 인해서 점차적으로 유체내부로 확장되기 시작하여 열성층현상의 전형적인 온도분포를 나타내며, 유체의 온도영향으로 인해 배관벽면 등온선 분포도 고온유체와 접촉하고 있던 배관의 상단부뿐만 아니라 하단부에서도 등온선 분포가 나타나기 시작한다. 배관벽의 온도분포를 살펴보면 경계면 부근의 배관내벽과 외벽의 온도차는 거의 없지만, 유체와 접하는 배관벽면의 온도분포가 성층화된 유체의 등온선과 바로 이어져서 나타나지 않고 배관벽면을 따라 상향방향으로 이동하여 나타난다. 이것은 유체에서 배관으로 r-방향 열전달량보다 배관벽면의 θ -방향 열전달량이 많기 때문이다. 유선분포는 전체적으로 복잡한 형태로 나타나지만 유동의 세기가 크지 않아 유동은 점차 안정되어간다.

Fig. 5의 (g), (h) 및 (i)는 무차원시간이 각각

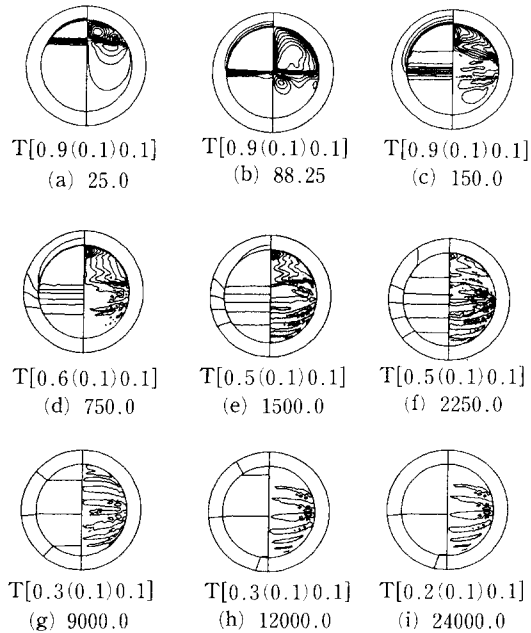


Fig. 5 The distribution of isotherms(left) and streamlines(right)

9000, 12000 및 24000으로 경과했을 경우의 유동 및 등온선분포를 나타내었다. 많은 시간이 경과함에 따라 고온유체는 저온유체와 배관벽면 등으로 열전달이 이루어져 유체 및 배관벽면들의 온도차가 감소하며, 유체의 온도와 배관벽면의 온도가 거의 일치하며, 고온 및 저온유체가 서로 혼합되어 배관내 열성층현상이 사라짐을 볼 수 있다. 유선분포는 열성층현상이 거의 사라지면서 고온유체와 저온유체의 온도차가 감소하여 배관전체 영역에서 아주 미미한 유동이 나타난다.

배관내벽의 상단부와 하단부 및 고온유체와 저온유체의 시간변화에 따른 온도차를 Fig. 6에 나타내었다. 초기에 유체의 최대온도차가 그대로 유지되는 시간부터 무차원시간 1500 동안에 배관내벽의 상단부와 하단부의 온도차는 유입된 고온유체의 영향으로 급격하게 증가하며 유체의 온도차는 급격하게 감소한다. 무차원시간 3000부터 유체 및 배관의 온도차가 거의 같게 유지되다가 무차원시간 10000 이후부터는 배관내벽의 온도차가 유체의 온도차보다 더 작게 나타난다. 이는 배관의 열전도계수가 유체의 열전달계수보다 크기 때문에 배관벽면이 상대적으로 빨리 열적평형에 도달하기 때문이다.

배관벽면에서 온도차가 가장 크게 나타나는 무차원시간은 약 1,632로 나타났으며, 이때 배관내벽의 하단부($\theta=\pi$) 및 상단부($\theta=0$) 위치에서의 최대 무차원온도차는 약 0.514로 나타났다. 따라서, 열응력의 크기는 배관상하단부의 온도차에 비례하여 나타나기 때문에 배관내부의 상단부로 고온유체가 유입되기 시작하여 무차원시간이 1,632 정도 경과

한 후에 열성층 현상에 의한 최대 열응력이 나타날 것으로 판단된다.

4.2 열전달량 분포

배관내벽과 유체 사이의 시간에 따른 열전달효과를 알아보기 위해, 국소 및 평균 Nusselt 수를 다음과 같이 정의하였다.

$$Nu = \frac{hr_i^*}{k} = -\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_i} \quad (15)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hr_i^*}}{k} = -\frac{1}{\pi} \int_0^\pi Nu \, d\theta \quad (16)$$

무차원시간 88.25, 1500 및 24000인 경우에 대한 배관내벽에서의 국소 열전달률을 Fig. 7에 나타내었다. 무차원시간 88.25인 경우, 배관상부에서 고온유체와 배관내벽과의 온도차가 크므로 국소 Nusselt 수가 크게 나타나며 고온 및 저온유체의 경계면에서 급격히 작아지며 배관하단부에서는 저온 유체와 배관내벽 사이의 온도차가 작아서 열전달률이 거의 나타나지 않는다. 점차 시간이 경과하면서 고온 및 저온유체의 열적혼합이 이루어져 무차원 시간 1632에서는 배관내벽 전체에서 열전달률이 작아지며, 무차원시간 24000에서는 완전 열적 평형상태로 열전달이 거의 일어나지 않는다. Fig. 8은 시간변화에 따른 배관내벽에서의 평균 Nusselt 수(\overline{Nu})의 분포를 나타낸다. 열성층 경계면의 위치가 배관단면의 절반에 도달하는 무차원시간 88.25까지는 \overline{Nu} 이 급격하게 증가하지만 이 시

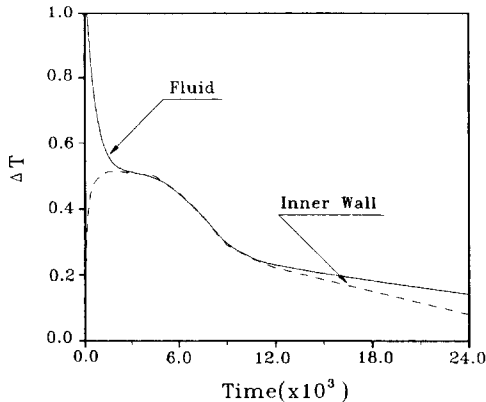


Fig. 6 The temperature difference of fluid and pipe wall

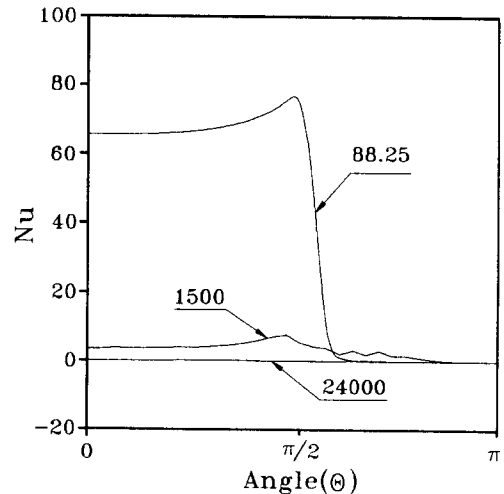


Fig. 7 The local nusselt number along the pipe inner wall

간 이후부터 무차원시간 1632까지는 반대로 급격하게 감소하며, 이후부터는 변화율이 매우 작아진다. 이것은 수위가 급속하게 변화하는 무차원시간 88.25까지는 저온유체의 온도와 같은 온도로 유지하던 배관벽면과 고온유체와의 온도차가 크기 때문에 열전달이 많이 이루어지지만 무차원시간 1632 이후부터는 점차 배관벽과 유체 사이의 온도차가 작아지기 때문에 고온유체에서 배관벽면으로의 열전달량이 적어지기 때문이다.

4.3 열응력분포

열성충현상에 대한 배관 내벽에서의 열응력을 Talja 와 Hansjosten⁽⁴⁾이 제안한 막(membrane)응력 및 굽힘(bending) 응력에 대한 간단한 계산식을 이용하여 검토하였다.

$$\sigma_m = \left(\frac{\theta}{\pi}\right) \beta \Delta T E \quad (17)$$

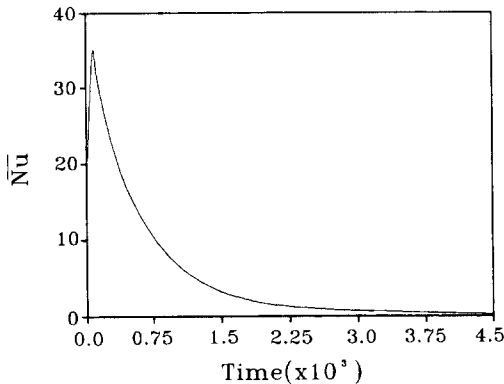


Fig. 8 The mean nusselt number with time

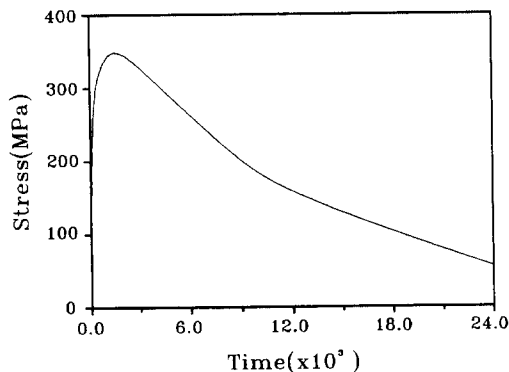


Fig. 9 The thermal stress at bottom of the pipe inner wall

$$\sigma_b = \left(\frac{2 \sin \theta}{\pi}\right) \beta \Delta T E \cos(\pi - \theta) \quad (18)$$

한 쪽 만이 고정되어 있는 지지조건(flexible support condition)으로 가정하여 구한 시간변화에 따른 배관내벽에서의 열응력을 Fig. 9에 나타내었다.

배관내의 열성충현상에 의한 배관내벽의 최대열응력(= $\sigma_m + \sigma_b$)은 배관의 상단부 및 하단부에서 최대온도차가 발생하는 무차원시간 1632에 나타났으며 그 크기는 약 360 MPa 정도였다. 시간변화에 따른 열응력분포는 Fig. 6의 배관 상단부와 하단부의 온도차가 변화하는 형태와 잘 일치하여 변화하였다.

5. 결 론

가압경수로형 원전의 가열시에 가압기 밀림관의 수평배관내에 열성충현상이 발생여부를 검토하였고, 열성충현상이 발생하는 경우에 시간변화에 따른 배관벽 및 배관내부의 유체의 유동 및 온도분포를 수치적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 배관단면적의 절반($\theta = \pi/2$)까지 수위가 변화하는 시간동안에는 배관 내부의 유동분포는 아주 복잡하게 나타나며, 유입된 고온유체의 온도는 배관벽면의 상단부에만 영향을 미치며, 이때 배관의 내·외벽 사이에는 온도차가 뚜렷하게 발생한다.

② 무차원시간이 약 1632 정도 경과한 후에 배관내벽의 상하단부 온도차가 가장 크게 나타나며 이때 배관벽면에서 가장 큰 열응력이 나타난다. 이때 무차원 최대온도차는 배관내벽에서 약 0.514 정도이며 열응력은 약 360 MPa 정도로 나타났다.

③ 무차원시간이 12000 이상 경과하면 자연대류의 영향에 의하여 고온 및 저온유체가 거의 혼합되어 열성충현상이 없어진다.

④ 고온유체의 수위가 배관의 절반에 도달하는 무차원시간인 88.25에서 국소 및 평균 Nusselt 수가 최대로 나타나며, 이 시간 이후에는 급격히 감소하고, 무차원시간이 12000 이후에는 거의 열전달이 일어나지 않는다.

참고문헌

- (1) NRC, 1988, "Thermal Stress in Piping Connected to RCS," *NRC Bulletin* No. 88~08.

- (2) NRC, 1988, "Pressurizer Surge Line Thermal Stratification," *NRC Bulletin* No. 88~11.
- (3) Shah, V. N. and MacDonald, P. E., 1989 "Residual Life Assessment of Major Light Water Reactor Components-Overview Volume 1," *NUREG/CR-4731 EGG-2469* Vol. 1, pp. 46~62
- (4) Talja, A. and Hansjosten, E., 1990, "Result of Thermal Stratification Test in a Horizontal Pipe Line at the HDR-Facility," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 118, pp. 29~41.
- (5) Wolf, L., Häfner, W., Geiss, M., Hansjosten, E. and Katzenmeier, G., 1992, "Result of HDR-Experiments for Pipe Load under Thermally Stratified Flow Conditions," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 137, pp. 387~404.
- (6) Kim, J. H., Ridd, R. M. and Deardorff, A. F., 1993, "Thermal Stratification and Reactor Piping Integrity," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 139, pp. 83~95.
- (7) Patankar, V., 1980, "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*," McGraw-Hill Book Company.
- (8) Lubin, B. T., 1989 "Evaluation of Calvert Cliffs Unit 1 Surge Line Temperature and Startup Conditions as a Basis for Determining YGN 3 & 4 Surge Line Wall Temperatures," *YGN 3 & 4 Design Data Status 1*.
- (9) ASME B 31.1 and Sec. II, 1992 Edition.
- (10) ASTM A 376/A376M-91a.