

## Heat Tracing이 있는 수평배관 내부 열성층 유동의 비정상 2차원 열전달 해석

정일석 · 송우영

전력연구원 원자력발전연구실

### An Analysis of Unsteady 2-D Heat Transfer of the Thermal Stratification Flow inside Horizontal Pipe with Electrical Heat Tracing

Ill-Seok Jeong and Woo-Young Song

Nuclear Power Generation Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

#### 요 약

수평배관의 열성층 유동을 완화하기 위하여 아래부분에 Heat Tracing을 한 수평배관의 외부 가열에 의한 열성층 유동과 열전달 특성을 수치적으로 해석하기 위하여 비정상 2차원 모델을 이용하였다. 무차원 지배방정식은 제어체적방법과 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 해를 구하였다. Heat Tracing이 있는 수평배관 내부 열성층 유동의 등온선, 유선분포, Nusselt수, 온도 분포를 해석하였다. 무차원 시간 1,500에서 최대 무차원 온도차가 0.424로 계산되어졌고 무차원 시간 9,000 이후에는 열성층 현상이 없어졌다.

**Abstract** — A method to mitigate the thermal stratification flow of a horizontal pipe line is proposed by heating external bottom of the pipe with electrical heat tracing. Unsteady two dimensional model has been used to numerically investigate an effect of the external heating on the thermal stratification flow. The dimensionless governing equations are solved by using the control volume formulation and SIMPLE algorithm. Temperature distribution, streamline profile and Nusselt number distributions are analyzed under heating conditions. The numerical results of this study show that the maximum dimensionless temperature difference between hot and cold sections of the inner wall of pipe is 0.424 at dimensionless time of 1,500 and the thermal stratification phenomenon disappears at about dimensionless time of 9,000.

#### 1. 서 론

중력장에서 비 회전 유체가 쉽게 혼합되지 않으면서 유체 밀도가 수직으로 변하고 수평면에서는 일정하게 층을 이루는 유체 형태를 성층현상(stratified system)이라 한다. 밀도분포가 안정되어 있지 않은 경우에는 밀도 차에 의한 자연대류 유동이 중요하고 성층화 현상이 안정되어 있으면 두 층 사이(interface)에서의 혼합현상이 중요하다. 원자력발전소에서도 시운전(startup)을 위한 가열(heat up)이나 고온 대기 운전(hot stand-by operation)과 같은 과도상태시 주급수 계통 및 원자로 냉각재

계통과 연결된 수평배관에서 고온 유체와 저온 유체가 층을 이루어 혼합되지 않는 현상이 발생하는데 이를 열성층(thermal stratification)현상이라 한다. 원전 수평배관에서의 열성층 현상은 배관 설계 시에 고려하지 않았던 열응력을 발생시킨다.

이에 따라 미국의 원자력 규제 위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)는 NRC bulletin No. 88-082)로 열성층 현상에 대한 원자력발전소 배관의 건전성을 평가하도록 고시하였고 특히 가압기 밀림관(pressurizer surge line)에서의 열성층 현상에 대한 문제점을 NRC bulletin No. 88-113)에 보고하였다. 기존 원전의 배관 설

계 시 열성층 현상에 의한 응력을 배관 열 하중으로 고려하지 않았으나 최근의 실험 및 해석 연구 결과<sup>4,7</sup>들에 의하면 열성층 현상에 의한 열응력이 배관 균열 발생, 배관의 불필요한 변위 생성, 배관 지지대 과 하중의 주요 원인으로 판명되었다.

열성층 현상에 의한 배관과 내부 유체의 열유동을 해석하기 위한 대부분의 해석 방법들은 최대 열응력이 발생하는 유체 및 배관의 온도 분포를 간단한 1차원 모델과 가정들을 적용하여, 열성층 현상 발생에 따른 배관의 온도 분포 계산 및 응력해석을 수행하였다<sup>8-10</sup>. 최근에는 염하기, 정일석 등이 수평배관 내부 열성층 유동을 위한 비정상 2차원 수치해석을 수행하고 원자력발전소 가압기 밀림관 내부의 열성층 유동을 해석하였다<sup>11,12</sup>. 가압기 밀림관 내부 열성층 유동의 시간에 따른 온도 및 유동 변화율을 계산한 결과 무차원시간 1632 정도 경과한 후에 배관 내벽의 상하단부 무차원 최대 온도차가 약 0.514 정도이며 무차원 시간 1200 이후에는 자연대류 영향으로 열성층 현상이 없어진다고 보고하였다<sup>13</sup>. 이들은 모두 열성층 현상과 영향에 대한 연구들이었고 열성층 현상을 완화하기 위한 현실적인 대안을 제시하는 연구는 지금까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 상기 가압기 밀림관의 열성층 현상을 완화하기 위한 방법으로 배관 하부에 전기 가열 (electrical heat tracing)하는 방식을 제안하고 그 효과를 분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. 발전소 시운전 가열(heat up) 과도상태 발생 시 가압기의 고온 냉각재가 배관 외벽 하부에서 외부 가열되는 밀림관(surge line) 내부의 저온 유체로 유입된다. 상부로부터 유입되는 고온 유체는 시간에 따라 배관의 중앙 부근까지 하강하며 유입 유량이 작고 두 유체간의 온도차가 크므로 수평배관내에서 밀도차에 의한 열성층 현상이 발생한다. 이러한 경우, 시간에 따른 가압기 밀림 수평배관 및 내부 유체의 유동, 온도 분포 및 열전달 특성을 분석하여 배관 하부의 Heat Tracing 가열에 의한 열성층 유동의 열전달 특성을 연구하였다.

## 2. 이론해석

본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같은 가압기 밀림관 수평 배관 부분에서 발생하는 열성층 현상에 대한 비정상 2차원 열 유동 해석을 수행하기 위하여 수평배관 원형 단면의 반경 및 원주 방향을  $r$  및  $\theta$  좌표로 선정한 원통 좌표계를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 외부 가열의 범위는 배관의 아래 부분  $3/4\pi < \theta < \pi$ 에서 열속  $10,000 \text{ W/m}^2$ 로 상용 전기 가열기(electrical heat tracing)의 범위 내로 설정하였다.

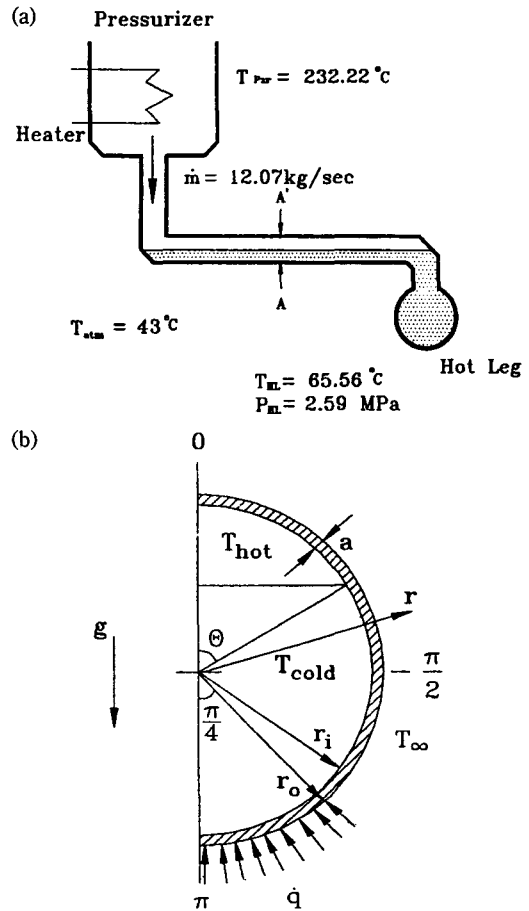


Fig. 1. (a) The heatup condition of the pressurizer surge line, (b) Schematic diagram of the calculation domain.

수평배관내에서 두 유체의 온도차에 의해 발생하는 열성층 현상을 해석하기 위해서, 물리적인 현상을 나타내는 지배 방정식들을 다음과 같은 가정들을 적용함으로써 단순화하였다.

- 고온 및 저온 유체는 비정상 상태 2차원 유동이다.
- 온도차에 의한 유체의 밀도 변화는 중력항에서만 존재하며, 그 이외의 유체 및 배관의 모든 물성치들은 일정하다.
- 유체의 압축성 효과, 점성 소산 및 복사 열전달은 무시한다.
- 고온 및 저온 유체 사이의 경계면 두께(혼합영역)는 무시할 정도로 작다.
- 저온 유체로 채워진 배관 내에 일정한 유량의 고온 유체가 배관상부로 유입 되어 형성되는 열성층 경계면의 위치는 시간에 따라 변화하지만 열성층 경계면

이 일정한 위치,  $\theta=\pi/2$ 에 도달하면 경계면은 더 이상 변화하지 않는다.

작은 외부 가열에 의한 열성층 완화 현상을 분석하기 위하여 가열 시간은 열성층 경계면이  $\theta=\pi/2$ 에 이르는 시간까지로 한다.

주어진 가정에 따라 채택된 모델의 유체 및 배관에 대한 원통 좌표계의 지배방정식에서 정의한 무차원 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r &= \frac{r^*}{r_i^*}, \quad a = \frac{(r_o^* - r_i^*)}{r_i^*}, \quad v = \frac{v^*}{U_o}, \quad u = \frac{u^*}{U_o}, \\ t &= \frac{t^* U_o}{r_i^*}, \quad T = \frac{T^* - T_{\text{cold}}^*}{T_{\text{hot}}^* - T_{\text{cold}}^*}, \quad P = \frac{P^*}{\rho_o U_o^2}, \\ Pr &= \frac{C_p \mu}{k}, \quad Re = \frac{U_o r_i^*}{\nu}, \\ Gr &= \frac{g \beta r_i^{*3} (T_{\text{hot}}^* - T_{\text{cold}}^*)}{\nu^2} \\ Bi &= \frac{h(r_o^* - r_i^*)}{k_s}, \quad Bi_q = \frac{\dot{q}^*(r_o^* - r_i^*)}{k_s(T_o^* - T_{\infty}^*)} \\ a_s &= \frac{k_s}{\rho_s C_{ps}}, \quad a_r = \frac{k}{\rho_o C_p}, \quad P^* = p^* + \rho_o g r^* \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

기준속도  $U_o$ 는 수평배관 길이방향의 가압기 밀림관으로 유입되는 고온유체의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 유동이 2차원이라고 가정하였지만 고온 유체의 유입 속도에 따라 유동 형태가 변화하고, 또한 열성층 현상의 판정기준인  $Ri$ 수( $=Gr/Re^2$ )가 무차원 지배방정식에서 나타날 수 있도록 하기 위해서  $U_o$ 를 기준속도로 선정하여 무차원 지배방정식에 반영하였다.

무차원변수를 적용하여 구한 무차원 지배방정식들은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ruv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (u^2)$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + C_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \right. \quad (3)$$

$$\left. - \frac{u}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right\} - \frac{uv}{r} - \frac{Gr}{Re^2} T \sin \theta$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (uv)$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial r} + C_1 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \right. \quad (4)$$

$$\left. - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right\} + \frac{u^2}{r} + \frac{Gr}{Re^2} T \cos \theta$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvT) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (uT) \quad (5)$$

$$= C_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right\}$$

본 연구에서의 계산모델은 유체 및 고체영역이 동시에 존재하므로 지배방정식에서의 각 영역에 대한 확산 계수  $C_1$  및  $C_2$ 는 운동량 및 에너지방정식에서 각각 다음과 같이 나타난다.

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

$$C_2 = \begin{cases} \frac{1}{PrRe} & \text{at fluid} \\ \frac{\alpha_s/\alpha_f}{PrRe} & \text{at solid} \end{cases} \quad (7)$$

무차원화된 초기 및 경계조건은 아래와 같다.

• 초기조건( $t=0$ )

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

• 경계조건( $0 < t < 88.25$ )

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

$$\frac{3}{4} \pi \leq \theta \leq \pi;$$

$$1 \leq r \leq 1+a \quad u=v=0$$

$$r=1+a \quad \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{(Bi_q - Bi)(T_o - T_{\infty})}{a} \quad (10)$$

### 3. 수치해석 방법

본 연구에서는 제어체적 방법(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<sup>14)</sup>을 사용하였다.

계산에 적용할 격자수 및 시간간격에 대한 최적의 값

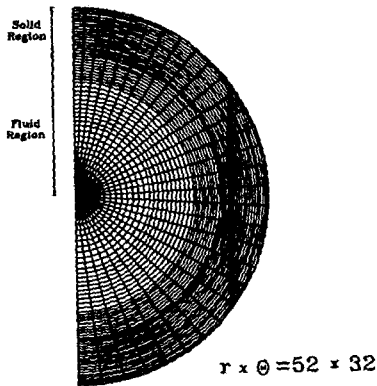


Fig. 2. The grid system of calculation domain.

을 구하기 위하여 여러 가지 격자수 및 시간간격들을 선정하여 예비계산을 수행하였다. 최적의 무차원 시간 간격은 0.25, 격자수는  $r \times \theta$  방향으로  $52 \times 32$ 로 결정하였다<sup>13)</sup>.

Fig. 2에는 본 수치계산에 적용된 수평 배관 단면의 격자 배치를 나타내었다.  $\theta$ -좌표는 고온 유체가 수평배관으로 유입되는 경우를 해석하기 때문에 배관의 상단부로 갈수록 세밀하게 배치하였다.  $r$ -좌표는 배관의 중심부보다는 배관 벽면 근처에서 유동 현상과 배관 내벽면에서의 온도분포가 관심의 대상이므로 배관 내벽면을 가장 세밀하게 격자를 배치하였다. 유체 영역은 세 부분으로 나누어 각 부분은 등간격이지만 배관 벽면으로 가까워질수록 세밀하게 배치하였다.

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

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

여기서, 종속변수  $\phi$ 는 속도 및 온도를 나타낸다. 각 시간 간격에서의 반복횟수는 초기에 약 200회 정도의 반복 계산 후에 수렴되었고, 시간이 지남에 따라서 반복 횟수는 점점 감소하였다.

수치해석 프로그램을 검증하기 위해서, HDR-Facility의 열성층 현상 실험<sup>6)</sup>에서 온도분포 측정결과와 본 프로그램의 모델을 적용한 계산결과를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. HDR 열성층 실험은 내경 400 mm, 길이 6 m의 수평배관 하부에서 11.6 kg/s의 저온 유체가 유입

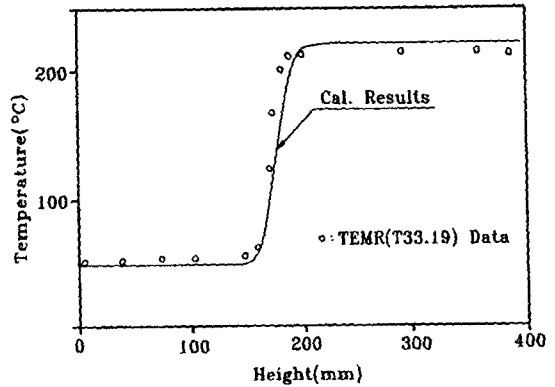


Fig. 3. The comparison between our result and HDR-experiment<sup>6)</sup>.

되면서 고온 유체와의 경계면 높이 173 mm, 온도차 165°C를 유지하는 정상상태 조건에서 배관 내부 유체의 수직 중심선 상의 온도분포를 측정하였다. HDR 실험조건을 개발한 수치해석 프로그램에 입력하고 내부유체 수직중심선 상의 온도분포를 중심선 높이에 따라 계산한 결과를 실험치와 비교하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 경계면 부근의 온도 분포가 약간의 차이를 나타내지만 온도 분포가 전체적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며 이를 바탕으로 본 계산을 수행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

가압경수로형 원자력발전소 가열 시에 가압기 밀림관의 양단 온도차가 가장 크게 나타나며, 이때 가압기 측에 있는 약 232°C의 고온 유체가 약 66°C의 저온 유체로 채워져 있는 수평배관의 상단부로 천천히 유입되기 시작한다.

이러한 경우에는 고온 유체와 저온 유체는 밀도차에 의해 수평배관내에서 서로 섞이지 않고 고온 유체는 배관 상단부에 존재하고, 상대적으로 온도가 낮은 저온 유체는 배관의 하단부로 분리된다. 정채된 저온 유체로 유입되는 고온 유체의 질량유량은 약 12.07 kg/sec이며, 가압기 밀림관 수평배관의 사양 및 물성치는 Table 1과 같다. 수평배관 주위의 공기 온도는 43°C로 일정하다고 가정하였고, Table 1에서의 열전달 계수는 배관 외부에 단열재가 설치되어 있는 경우에 배관 단열재 외부와 공기사이의 설계 허용 열전달 계수이다.

무차원 지배 방정식 및 경계조건에 나타난 수평배관 내 열성층 유동 현상을 지배하는 무차원수는 Gr, Re, Pr 및 Bi 등이며 발전소 가열 시 조건을 대입하여 구한 무차원수 및 계산에 사용된 관련 변수들의 값을 Table

**Table 1. Design specifications of surge line<sup>16,17</sup>.**

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 coefficient	0.79 W/m <sup>2</sup> C
Ambient temperature	43°C

**Table 2. Dimensionless numbers at given conditions.**

Dimensionless No.	Value
Gr	1.9381010
Re	1.199105
Pr	1.1712
Bi	1.87 × 10 <sup>-3</sup>
Ri	1.35
T <sub>∞</sub>	-9.94 × 10 <sup>-2</sup>
a	0.31
α <sub>s</sub> /α <sub>t</sub>	22.2
k <sub>s</sub> /k <sub>t</sub>	22.65

2에 나타내었다.

이러한 열성층 현상은 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 0이상이며, 유체가 열적으로 안정된 열성층을 이루기 위한 Ri 수는 1.0 이상이다. 열성층현상 발생조건을 Re 수에 따른 실험결과<sup>16)</sup>를 살펴보면 수평배관에서 열성층현상의 발생 기준은 다음과 같다.

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

$$Ri \geq 1.0 \quad \text{at } Re \geq 10^3 \quad (14)$$

계산된 Re 및 Ri를 실험결과와 비교하여 보면 Re는

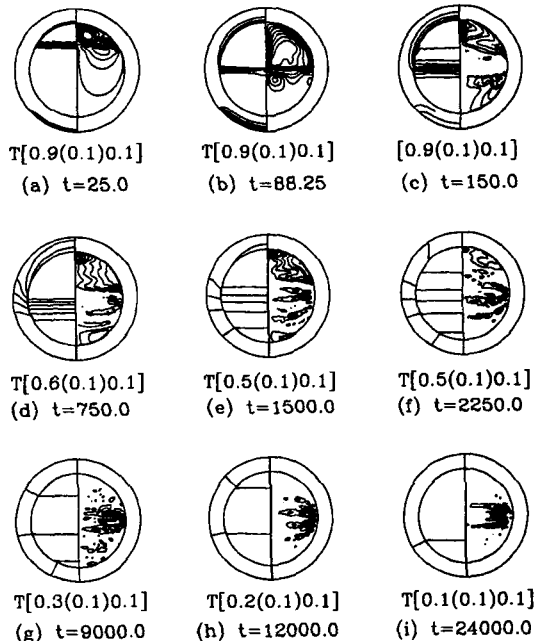
10<sup>3</sup>보다 크고 Ri 수가 1보다 크기 때문에 주어진 조건에서는 열성층 현상이 발생된다고 판단할 수 있다.

#### 4-1. 등온선 및 유동 분포

배관 외부 가열의 주어진 가정에 따라 열성층 현상의 변화를 수치해석하고 시간에 따른 등온선과 유선 분포를 계산하였다. Fig. 4에서 우측 반원은 각 시간대의 유동 분포를 나타내며 좌측 반원은 등온선 분포를 나타낸다. 등온선 분포의 최대 값, 최소 값 및 각 변수의 간격을 나타내는 표시로 [최대 값 (간격) 최소 값] 형태 기호로 나타낸다.

Fig. 4의 (a), (b) 및 (c)는 초기에 저온 유체가 채워진 수평배관 내부에 고온유체가 유입되기 시작하여 무차원 시간 25.0인 시점, 열성층 경계면이 배관 상단부에서부터 수평배관 단면적의 절반위치( $\theta = \pi/2$ )까지 수위가 도달한 무차원시간 88.25인 시점 및 초기의 고온 유체가 유입된 후 무차원 시간 150.0이 경과한 시점에서의 온도 및 유동 분포를 나타낸다.

등온선 분포를 살펴보면 고온 유체가 배관 내부로 유입되는 시점부터 무차원 시간 88.25까지의 시간 동안, 유체 영역 내에서는 고온 유체와 저온 유체가 접촉하는 경계면에서 등온선이 집중되고 있으며, 배관 상단부 벽면에서는 유입되는 고온 유체의 영향으로 단지 내벽근



**Fig. 4. Distributions of isotherms (left) and streamlines (right).**

처에서만 등온선이 나타난다. 무차원 시간 88.25까지는 외부 가열에 의한 열이 배관 내벽까지 전도되지 않아 등온선 분포가 배관 하단부 내벽면까지 미치지 못하지만 배관 하단부의 온도를 상승시킨다.

그리고 무차원 시간이 150.0 정도 경과한 후에는 상단부의 배관의 내벽과 외벽사이의 온도차가 점차 크게 나타나기 시작한다. 배관 상단부에서는 배관벽과 유체 사이의 온도차가 크고, 배관 외부가 단열재로 처리되어 있어 배관 외부로의 열방출량보다 유체에서 배관벽으로의 열전달량이 많기 때문에 배관 벽 상단부에서는 배관 벽을 따라 등온선이 경사지게 나타난다.

무차원 시간 150에서는 Heat Tracing에 의해 가열된 배관 하단부 외벽의 등온선이 내벽으로 전도, 확산되어 가는 것을 볼 수 있다. 가운데 배관의 등온선이 나타나지 않는 것은 계산된 등온선 값이 최저 등온선의 크기 0.1 이하이기 때문이다. 배관 하단부 내벽 근처의 유체는 가열된 배관 하단부의 영향으로 온도가 상승하면서 배관 내부 저온 유체로 자연대류 열전달 확산하므로 유선이 열성층 현상의 수평 분포<sup>13)</sup>를 벗어나 45° 이상 수직 분포를 보인다.

Fig. 4의 (d), (e) 및 (f)는 무차원시간이 각각 750, 1,500 및 2,250을 경과한 후의 유동 및 등온선 분포를 나타낸다. 유체 영역 내에서는 초기에 배관 하부의 외부 가열 Heat Tracing과 배관 상부로의 고온 유체 유입으로 고온 및 저온 유체의 경계면 부근에 집중되어 있던 등온선들이 시간이 경과함에 따라 자연대류 열전달로 인해서 점차적으로 유체 내부로 확장되기 시작하여 열성층 현상의 전형적인 온도분포를 나타낸다. 유체의 온도 분포 영향으로 인해 배관 벽면의 등온선 분포도 고온 유체와 접촉하고 있던 배관의 상단부뿐만 아니라 하단부에서도 등온선 분포가 나타나기 시작한다.

배관벽의 온도 분포를 살펴보면 경계면 부근의 배관 내벽과 외벽의 온도차는 거의 없지만, 유체와 접하는 배관벽의 온도 분포가 성층화된 유체의 등온선과 바로 이어져서 나타나지 않고 배관벽을 따라 상향으로 이동하여 나타난다. 이것은 유체에서 배관으로 r-방향 열전달량보다 배관 벽면의  $\theta$ -방향 열전달량이 많기 때문이다. 유선 분포는 전체적으로 복잡한 형태로 나타나지만 유동의 세기가 크지 않아 유동은 점차 안정되어 가고 외부 가열에 의해 발생했던 저온 유체 아래 부분의 순환 유선도 무차원 시간 2,250에서는 나타나지 않는다.

Fig. 4의 (g), (h) 및 (i)는 무차원 시간이 각각 9,000, 12,000 및 24,000으로 경과했을 경우의 유동 및 등온선 분포를 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 가열된 배관 하단부와 고온 유체는 저온 유체와 주위 배관벽으로 열전달이 이루어져 유체와 배관 벽 사이의 온도차가 감소하

고 유체와 배관벽의 온도가 거의 일치한다. 무차원 시간 9,000에서는 고온 및 저온 유체가 서로 혼합되어 유체 상부와 하부의 순환 유선이 완전히 없어지고 배관 내 열성층 현상이 사라짐을 볼 수 있다. 유선 분포는 열성층 현상이 거의 사라지면서 고온 유체와 저온 유체의 온도차가 감소하여 배관 내부 전체 영역에서 아주 미미한 유동이 나타난다.

#### 4.2. 온도 분포

배관 내외벽의 상단부( $\theta=0$ )와 하단부( $\theta=\pi$ ), 고온 유체와 저온 유체의 시간변화에 따른 온도차를 Fig. 5에 나타내었다. 배관 하단부 외벽은 초기 무차원 시간 88.25까지의 Heat Tracing에 의한 온도 상승으로 외벽의 무차원 온도차가 0.472까지 증가한다. 그러나 외부 가열이 중단되고 고온 유체의 유입으로 배관 상단부 외벽의 온도가 상승하면 외벽의 무차원 온도차는 다시 감소하여 무차원 시간 250에서 외벽의 온도차가 0.180까지 감소한다. 무차원 시간 250에서 2,500까지 외부 벽면의 온도차가 증가하는 이유는 하단부에서 외부 열전달로 온도가 감소하고 상단부는 반대로 고온 유체로부터의 열전달로 온도가 상승하기 때문이다.

배관 내벽은 유입된 고온 유체의 영향으로 초기 상단부의 온도차가 급격하게 증가하며 유체의 온도차는 상부 고온 유체의 열 손실과 하부 저온 유체의 Heat Tracing에 의한 온도 상승으로 급격하게 감소한다. 무차원 시간 약 2,500부터 유체 및 배관의 무차원 온도차가 비슷해지고 이후는 시간에 따른 온도차의 감소가 유체, 배관 내외 벽 모두 같은 경향을 보인다.

배관 내벽에서 온도차가 가장 크게 나타나는 무차원 시간은 약 1,500으로 나타났으며, 이때 배관 내벽의 하단부( $\theta=\pi$ ) 및 상단부( $\theta=0$ ) 위치에서의 최대 무차원 온도

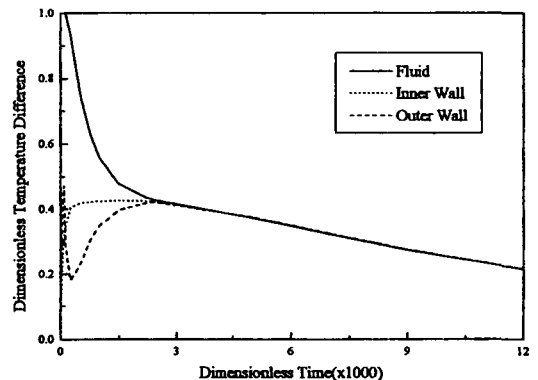


Fig. 5. The temperature difference of fluid and pipe inner and outer walls.

차는 약 0.426으로 나타났다. 따라서, 열응력의 크기는 배관 상하단부의 온도차에 비례하여 나타나기 때문에 배관 내부의 상단부로 고온 유체가 유입되기 시작하여 무차원시간이 1,500 정도 경과한 후에 열성층 현상에 의한 최대 열응력이 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 배관 내벽과 외벽에서 원주방향 무차원 온도 분포의 시간에 따른 변화를 계산한 것이다. Fig. 6(a)의 배관 내벽 상단부와 하단부는 시간에 따라 각각 고온대와 저온대에서 온도가 증가하다가 하단부는 무차원 시간 약 750부터 온도 상승이 둔화되기 시작한다. Fig. 6(b)의 배관 외벽 상단부에서는 고온 유체로부터의 지속적인 열전달로 무차원 시간 1,500에서도 온도 상승이 지속된다. 그러나 외벽 하단부는 Heat Tracing에 의해 무차원 온도 0.472까지 가열되었다가 주변 외기로의 열전달과 배관 내부로의 전도 열전달 확산으로 시간에 따라 온도가 감소한다.

Fig. 7(a)와 7(b)는 배관 상하단부 내외벽의 시간에 따른 온도변화를 나타낸다. 상단부 내벽은 고온 유체의 유입으로 외벽보다 높은 온도를 유지하다 열전달량이 작은 무차원 약 2,250부터는 저온 유체와 비슷한 온도 저하 경향을 보인다. Fig. 7(b)의 하단부 외벽은 초기 외부 가열

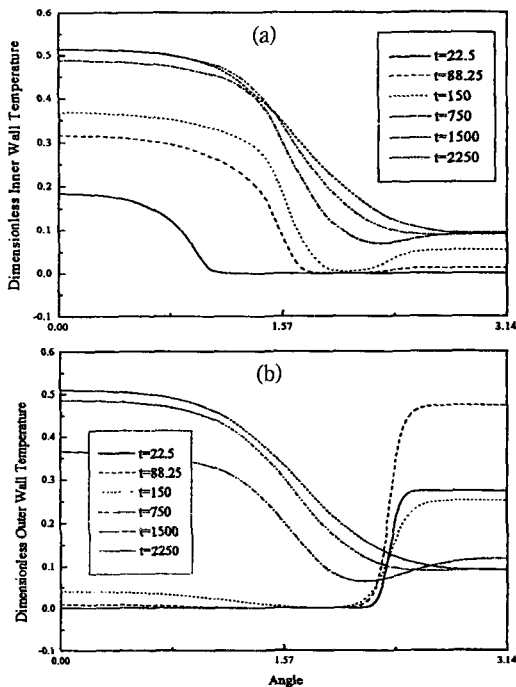


Fig. 6. (a) Temperature distributions along the pipe inner wall, (b) Temperature distributions along the pipe outer wall.

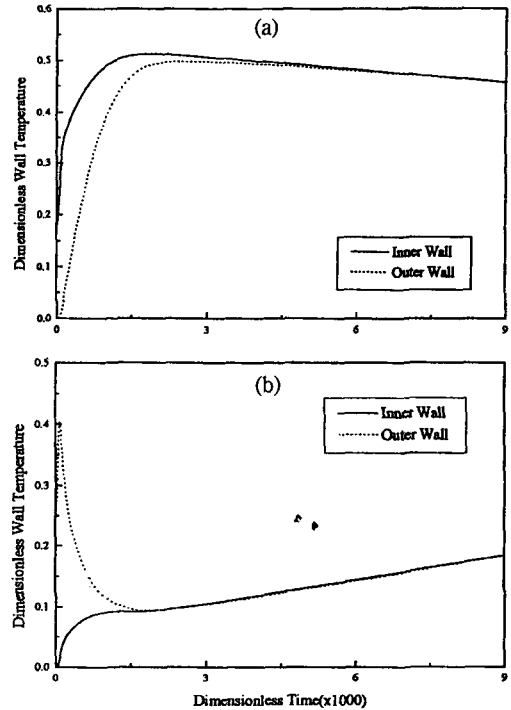


Fig. 7. (a) Temperature distributions of inner and outer wall of pipe top side, (b) Temperature distributions of inner and outer wall of pipe bottom side.

에 의한 온도 Peak를 보이고 내벽은 외벽으로부터의 열전달로 온도가 상승하다가 무차원 시간 750부터 온도 상승이 둔화되기 시작한다. 무차원 시간 약 2,000에서는 하단부 내외벽의 온도가 같아지고 이후에는 온도가 완만하게 상승한다.

#### 4-3. 열전달량 분포

배관 내벽과 유체사이의 시간에 따른 열전달 효과를 알아보기 위해 국소 및 평균 Nusselt 수를 다음과 같이 정의하였다.

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

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h} r_i^*}{k} = \frac{1}{\pi} \int_0^x Nu \, d\theta \quad (16)$$

Fig. 8은 외부 가열의 경우, 무차원 시간대 별 배관 내벽에서의 국소 열전달율을 계산한 것이다. 무차원 시간 88.25인 경우에는 배관 상부에서 고온 유체와 배관 내벽과의 온도차가 크므로 국소 Nu 수가 크게 나타나고 배관 상단부( $0 < \theta < \pi/2$ )에서 대부분의 열이 고온 유체

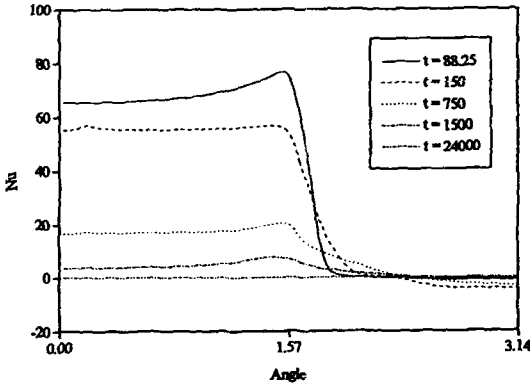


Fig. 8. The local Nusselt number along the pipe inner wall.

에서 배관 내벽면으로 전달된다. 그러나 무차원 시간 150과 750에서는 배관 하단부의 외부 가열에 의한 열이 저온 유체로 전달되기 때문에 (-)Nu 수가 계산된다.

Fig. 9는 배관 상하부 내벽에서의 시간에 따른 Nu 수 변화, 즉 열전달량의 변화를 보여 주는 것으로서 상부 고온 유체에서 벽면으로의 활발한 열전달과 초기 Heat Tracing에 의한 하부 벽면에서 저온 유체로의 열전달량 변화를 잘 나타내고 있다.

Fig. 10은 시간변화에 따른 배관 내벽에서의 평균 Nusselt수( $\bar{Nu}$ )의 분포를 나타낸다. 열성층 경계면의 위치가 배관단면의 절반에 도달하는 무차원 시간 88.25까지는  $\bar{Nu}$ 이 급격하게 증가하지만 이어 배관 내벽의 온도차가 가장 커지는 무차원 시간 1,500까지 급격하게 감소하며, 이 시간 이후부터는 변화율이 매우 작아진다. 이것은 수위가 급속하게 변화하는 무차원 시간 88.25까지는 저온 유체의 온도와 같은 온도로 유지하던 배관벽과 고온 유체와의 온도차가 크기 때문에 열전달이 많이

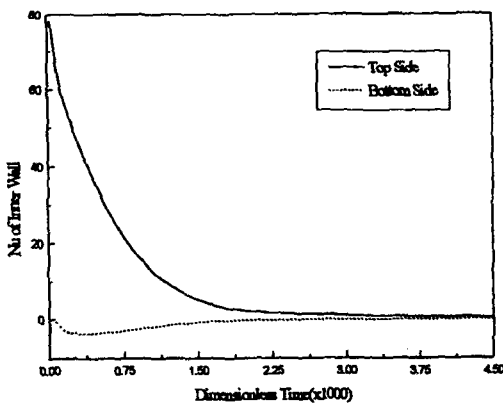


Fig. 9. The local Nusselt number of the inner wall of pipe top and bottom.

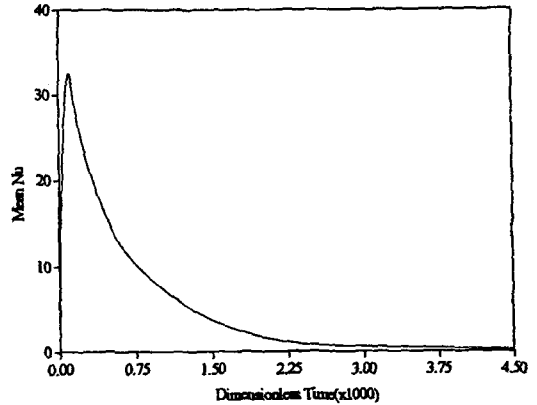


Fig. 10. The mean Nusselt number with time.

이루어지지만 무차원 시간 2,250이후부터는 점차 배관 벽과 유체사이의 온도차가 작아져 고온 유체에서 배관 벽면으로의 열전달량이 적어지기 때문이다.

### 5. 결 론

가압경수로형 원전의 가열 시에 가압기 밀림관의 수평배관내에 발생하는 열성층 현상을 완화하기 위한 방안으로 배관 아래 부분을 Heat Tracing으로 외부에서 가열하는 방안을 제안하였다. Heat Tracing이 있는 수평배관 내부의 열성층 현상의 열전달 현상을 해석하기 위하여 시간 변화에 따른 배관벽 및 내부의 유체 유동 및 온도 분포를 계산하는 2차원 비정상 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

배관 단면적의 절반( $\theta=\pi/2$ )까지 수위가 변화하는 시간동안에는 배관 내부의 유동 분포는 아주 복잡하게 나타나며, 유입된 고온 유체의 온도는 배관 벽면의 상단부에만 영향을 미치며, 이때 배관의 내외벽 사이에는 온도차가 뚜렷하게 발생한다.

무차원 시간이 약 1,500 정도 경과한 후에 배관 내벽의 상하단부 무차원 온도차가 0.424로 가장 크게 나타난다. 무차원 시간이 9,000 이상 경과하면 자연대류의 영향에 의하여 고온 및 저온 유체가 혼합되어 열성층 현상이 없어진다.

배관 상하단부 내외벽의 온도는 무차원 시간 약 2,000~2,250에서 비슷해지며 그 이후로 상단부는 온도가 감소하고 하단부는 완만하게 상승하나 열전달량은 매우 작다.

고온 유체의 수위가 배관의 절반에 도달하는 무차원 시간인 88.25에서 국소 및 평균 Nusselt 수가 최대로 나타나며, 이 시간 이후에는 급격히 감소하고, 무차원 시간이 9,000 이후에는 열전달이 일어나지 않는다.



## 사용기호

a	: 배관의 두께
$B_i$	: Biot 수
$C_1, C_2$	: 확산 계수
$C_p$	: 정압 비열
g	: 중력 가속도
Gr	: Grashof 수
h	: 열전달 계수
k	: 열전도 계수
$\dot{m}$	: 질량 유량
Nu	: Nusselt 수
P	: 압력
Pr	: Prandtl 수
$\dot{q}$	: 열속(heat flux)
r	: 반경방향
Re	: Reynolds 수
Ri	: Richardson 수
T	: 온도
t	: 시간
$U_0$	: 기준 속도
u, v	: 속도
$\alpha$	: 열 확산 계수
$\beta$	: 열팽창 계수
$\theta$	: 원주 방향 및 각도
$\phi$	: 종속 변수
$\sigma$	: 최대 열응력

### 상첨자

*	: 유차원 값
m	: 반복 계산 회수
--	: 평균 값

### 하첨자

atm	: 대기
f, s	: 유체 및 고체 영역
HL	: 고온관
hot, cold	: 고온 및 저온
i, o	: 내부 및 외부
pzi	: 가압기
q	: 외부 가열
$\infty$	: 주변 대기

## 참고문헌

- Turner, J.S.: "Buoyancy Effects in Fluid", Cambridge University Press, London (1979).
- Nuclear Regulatory Committee: "Thermal Stress in Piping Connected to RCS", NRC Bulletin No. 88-08 (1988).
- Nuclear Regulatory Committee: "Pressurizer Surge Line Thermal Stratification", NRC Bulletin No. 88-11 (1988).
- Shah, V.N. and MacDonald, P.E.: "Residual Life Assessment of Major Light Water Reactor Components-Overview, Volume 1", NUREG/CR-4731, EGG-2469 1, 46-62 (1989).
- Talja, A. and Hansjosten, E.: "Result of Thermal Stratification Test in a Horizontal Pipe Line at the HDR-Facility", Nuclear Engineering and Design, **118**, 29-41 (1990).
- Wolf, L., Hafner, W., Geiss, M., Hanjostan, E. and Katzenmeier, G.: "Result of HDR-Experiments for Pipe Load under Thermally Stratified Flow Conditions", Nuclear Engineering and Design, **137**, 387-404 (1992).
- Kim, J.H., Ridt, R.M. and Deardorff, A.F.: "Thermal Stratification and Reactor Piping Integrity", Nuclear Engineering and Design, **139**, 83-95 (1993).
- Smith, W.R., Cassel, D.S. and Schlereth, E.P.: "A Solution for the Temperature Distribution in a Pipe Wall Subjected Internally Stratified Flow", Proceeding of 1988 Joint ASME-ANS Nuclear Power Conference, 45-50 (1988).
- Ensel, C., Clas, A. and Barthes M.: "Stress Analysis of a 900 MW Pressurizer Surge Line Including Stratification Effect", Nuclear Engineering and Design, **153**, 197-203 (1995).
- Ahn, J.S., Ko, Y.S., Kim, Y.H., Park, B.H. and Kim, E.K.: "Analysis of the Circumference Wall Temperature in a Long Horizontal Pipe with Thermal Stratification", Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 364-370 (1995).
- 염학기, 박만홍, 정일석: "가압기 써지라인의 수평배관내 열성층 유동 수치해석", 대한기계학회 열 및 유체공학 부문 학술대회, 제주대학 (1995).
- Youm, H.K., Park, M.H., and Kim, S.N.: "The Unsteady 2-D Numerical Analysis in a Horizontal Pipe with Thermal Stratification", Journal of the Korean Nuclear Society, **28**(1), 27-35 (1996).
- 정일석, 김유, 염학기, 박만홍: "가압기 밀림관의 수평배관내 열성층유동", 대한기계학회논문집(B), **20**(4), 1449-1457 (1996).
- Patankar, V.: "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Book Company, New York

- (1980).
15. Lubin, B.T.: "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 (1989).
16. ASME B 31.1 and Sec. II, 1992 Edition.
17. ASTM A 376/A376M-91a.