

<논 문>

## 가압기 밀림관 수평배관 외부 가열에 의한 열성층 유동 완화 수치해석

정 일 석\* · 김 유\*\*

(1996년 10월 1일 접수)

### Numerical Analysis for Mitigating Thermal Stratification Flow of Pressurizer Surge Horizontal Pipe by Outside Heating

I. S. Jeong and Y. Kim

**Key Words :** Thermal Stratification(열성층), Mitigating(완화), Surge Line(밀림관), Control Volume Formulation(제어체적방법), Unsteady State(비정상 상태), Numerical Analysis(수치해석)

#### Abstract

A method to mitigate the thermal stratification phenomenon of pressurizer surge line is proposed by heating bottom outside of horizontal pipe. Unsteady two dimensional model has been used to numerically investigate an effect of heating the bottom of pipe. The dimensionless governing equations are solved by using the control volume formulation and SIMPLE algorithm. Temperature and streamline profiles of fluids and pipe walls with time are compared with the previous study result. The numerical result of this study shows that the outside heating can relaxate the thermal stratification flow of the pressurizer surge line. Maximum dimensionless temperature difference between hot and cold sections of the pipe inner wall which causes thermal stratification was reduced from 0.514 to 0.424 at dimensionless time 1,632 and 1,500 respectively.

기 호 설 명		
$a$ : 배관 두께의 무차원 길이 $Bi$ : Biot 수 $C_1, C_2$ : 확산계수 $C_p$ : 정압 비열 $g$ : 중력 가속도 $Gr$ : Grashof 수 $h$ : 열전달계수 $k$ : 열전도계수 $\dot{m}$ : 질량 유량 $Nu$ : Nusselt 수	$P$ : 무차원 압력 $Pr$ : Prandtl 수 $\dot{q}$ : 열속(heat flux) $r$ : 반경방향 및 무차원 길이 $Re$ : Reynolds 수 $Ri$ : Richardson 수 $T$ : 무차원 온도 $t$ : 무차원 시간 $U_0$ : 기준 속도 $u, v$ : 원주방향, 반경방향 무차원 속도 $\alpha$ : 열확산계수 $\beta$ : 열팽창계수 $\theta$ : 원주방향 및 각도	

\*회원, 전력연구원

\*\*회원, 충남대학교 기계공학과

$\phi$	: 종속 변수
$\sigma$	: 응력
<b>상첨자</b>	
*	: 유차원값
$m$	: 반복 계산 횟수
—	: 평균값
<b>하첨자</b>	
$f, s$	: 유체 및 고체 영역
$hot, cold$	: 고온 및 저온
$i, o$	: 내부 및 외부
$pzr$	: 가압기
$HL$	: 고온관
$q$	: 외부 가열
$atm$	: 대기
$\infty$	: 주변 대기

## 1. 서 론

중력장에서 비회전 유체가 쉽게 혼합되지 않으므로 유체 밀도가 수직으로 변하고 수평면에서는 일정하게 층을 이루는 유체 형태를 성층현상(stratified system)이라 한다. 밀도분포가 안정되어 있지 않은 경우에는 밀도차에 의한 자연대류 유동이 중요하고, 성층화 현상이 안정되어 있으면 두 층 사이에서의 혼합현상이 중요하다.<sup>(1)</sup> 원자력발전소에서 시운전을 위한 가열이나 고온대기 운전과 같은 과도상태시 주급수 계통 및 원자로냉각재 계통과 연결된 수평배관에서 고온 유체와 저온 유체가 층을 이루어 혼합되지 않는 현상이 발생하는데 이를 열성층(thermal stratification)현상이라 한다. 원전 수평배관에서의 열성층현상은 배관 설계시에 고려하지 않았던 열응력을 발생시킬 수도 있다.

이에 따라 미국의 원자력 규제 위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)는 NRC bulletin No. 88-08<sup>(2)</sup>로 열성층현상에 대한 원자력발전소 배관의 건전성을 평가하도록 고시하였고 특히 가압기 밀림관(pressurizer surge line)에서의 열성층 현상에 대한 문제점을 NRC bulletin No. 88-11<sup>(3)</sup>에 보고하였다. 기존 원전의 배관 설계시 열성층 현상에 의한 응력을 배관 열하중으로 고려하지 않았으나 최근의 실험 및 해석 연구결과<sup>(4~7)</sup>들에 의하면 열성층현상에 의한 열응력이 배관 균열 발생, 배관의 불필요한 변위 생성, 배관 지지대 과하중의 주요

원인으로 판명되었다.

열성층현상에 의한 배관과 내부 유체의 열유동을 해석하기 위한 대부분의 해석방법들은 최대 열응력이 발생하는 유체 및 배관의 온도분포를 간단한 1차원 모델과 가정들을 적용하여, 열성층현상 발생에 따른 배관의 온도분포 계산 및 응력해석을 수행하였다.<sup>(8~10)</sup> 최근에는 염화기, 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 유동 시간에 따른 온도 및 유동 변화를 계산한 결과 무차원시간 1,632 정도 경과한 후에 배관 내벽의 상하단부 무차원 최대 온도차가 약 0.514 정도이며 무차원 시간 1,200 이후에는 자연대류 영향으로 열성층현상이 없어진다고 보고하였다.<sup>(13)</sup> 이들은 모두 열성층현상과 영향에 대한 연구들이었고 열성층현상을 완화하기 위한 현실적인 대안을 제시하는 연구는 지금까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 위의 가압기 밀림관의 열성층현상을 완화하기 위한 방법으로 배관 하부에 전기 가열(heat tracing)하는 방식을 제안하고 그 효과를 분석하기 위한 수치해석을 수행하였다. 발전소 시운전 가열 과도상태 발생시 가압기의 고온 냉각재가 배관 외벽 하부에서 외부 가열되는 밀림관 내부의 저온 유체로 유입된다. 상부로부터 유입되는 고온 유체는 시간에 따라 배관의 중앙 부근까지 하강하며 유입 유량이 적고 두 유체간의 온도차가 크므로 수평배관 내에서 밀도차에 의한 열성층현상이 발생한다.

이러한 경우 시간 변화에 따른 가압기 밀림 배관 및 내부 유체의 유동, 온도분포 및 열전달 특성을 분석하고 외부 가열하지 않는 경우의 선행 연구<sup>(13)</sup>와 비교하여 배관 하부 가열에 의한 열성층 유동 완화 특성을 연구하였다.

## 2. 이론해석

본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같은 가압기 밀림관 수평배관 부분에서 발생하는 열성층현상에 대한 비정상 2차원 열유동 해석을 수행하기 위하여 수평배관 원형 단면의 반경 및 원주 방향을  $r$  및  $\theta$  좌표로 선정한 원통 좌표계를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 외부 가열의 크기는 배관의 아래 부분  $3/4\pi < \theta < \pi$ 에서 열속  $10,000\text{W/m}^2$ 으로 상용 전기가열기의

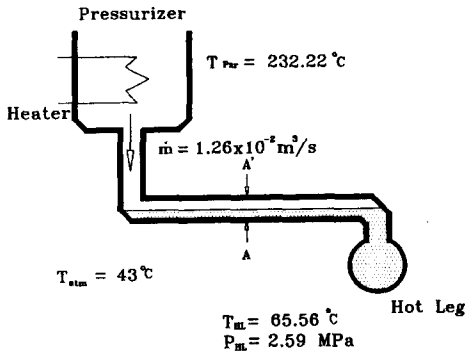


Fig. 1(a) The heatup condition of pressurizer surge line

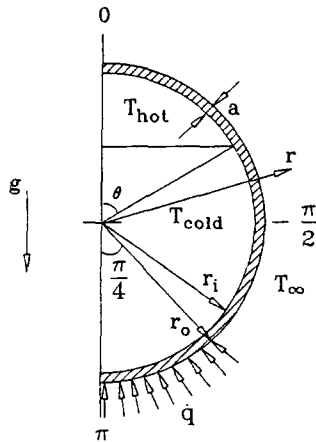


Fig. 1(b) The schematic diagram of the calculation domain

범위 내로 설정하였다.

수평배관 내에서 두 유체의 온도차에 의해 발생하는 열성층현상을 해석하기 위해서, 물리적인 현상을 나타내는 지배방정식들을 다음과 같은 가정들을 적용함으로써 단순화하였다.

- 고온 및 저온 유체는 비정상 상태 2차원 유동이다.
- 온도차에 의한 유체의 밀도 변화는 중력 항에서만 존재하며, 그 이외 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 유입되어 형성되는 열

성층 경계면의 위치는 시간에 따라 변화하지만 열성층 경계면이 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.

$$r = \frac{r^*}{r_i^*}, \quad a = \frac{(r_o^* - r_i^*)}{r_i^*}, \quad v = \frac{v^*}{U_o}, \quad u = \frac{u^*}{U_o}$$

$$t = \frac{t^*}{r_i^*/U_o}, \quad T = \frac{T^* - T_{cold}^*}{T_{hot}^* - T_{cold}^*}, \quad P = \frac{P^*}{\rho_o U_o^2}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}, \quad Re = \frac{U_o r_i^*}{\nu}$$

$$Gr = \frac{g \beta r_i^{*3} (T_{hot}^* - T_{cold}^*)}{\nu^2}$$

$$Bi = \frac{h(r_o^* - r_i^*)}{k_s}, \quad Bi_q = \frac{q^* r_i^*}{k_s (T_o^* - T_\infty^*)}$$

$$a_s = \frac{k_s}{\rho_s C_{ps}}, \quad a_r = \frac{k}{\rho_o C_p}, \quad P^* = p^* + \rho_o g r^* \cos \theta \quad (1)$$

기준속도  $U_o$ 는 수평배관 길이방향의 가압기 밀림관으로 유입되는 고온유체의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 유동이 2차원이라고 가정하였지만 고온 유체의 유입속도에 따라 유동 형태가 변화하고, 또한 열성층현상의 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.

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

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

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

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

$$= C_2 \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right\} \quad (5)$$

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

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

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

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 ( $t>0$ ): 외부 가열이 없는 경우

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

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

-경계조건 ( $0 < t < 88.25$ ): 외부 가열이 있는 경우

$$\begin{aligned} 0 \leq r \leq 1+a; \\ \theta = 0, \pi, \quad u = \frac{\partial v}{\partial \theta} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{4}\pi \leq \theta \leq \pi; \\ 1 \leq r \leq 1+a, \quad u = v = 0 \\ r = 1+a, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{(Bi_q - Bi)(T_o - T_\infty)}{a} \end{aligned} \quad (12)$$

### 3. 수치해석 방법

본 연구에서는 제어체적 방법(control volume formulation)을 적용하였으며, 이산화방정식은 열전달 및 유동해석에 널리 사용되고 있는 SIMPLE 알고리즘과 선순법(line-by-line method)을 이용한 TDMA를 적용하는 기존의 수치해석 방법<sup>(14)</sup>을 사용하였다.

계산에 적용할 격자수 및 시간간격에 대한 최적

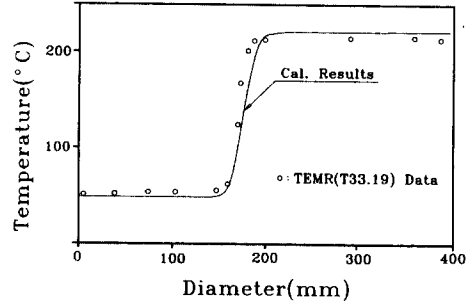


Fig. 2 The comparison between present result and HDR-experiment<sup>(6)</sup>

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

비선형 미분방정식들을 반복 계산할 때 수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위해서 하향 이완계수를 사용하였다. 해의 수렴은 1회 반복 계산마다 열평형을 조사하여 오차가 0.1% 이하이고, 식 (13)과 같이 각 변수들의 오차가 다음과 같은 허용범위 이내로 계산되면 수렴한 것으로 판정하였다.

$$\left| \frac{\phi^{m+1} - \phi^m}{\phi^m} \right| < 10^{-3} \quad (13)$$

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

수치해석 프로그램을 검증하기 위해서, HDR-Facility의 열성층현상 실험<sup>(6)</sup>에서 측정된 온도분포 결과와 본 프로그램의 모델을 적용한 계산결과를 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 경계면 부근의 온도분포가 약간의 차이를 나타내지만 온도분포가 전체적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며 이를 바탕으로 본 계산을 수행하였다.

### 4. 결과 및 비교 분석

가압경수로형 원자력발전소 가열시에 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 밀도 차에 의해 수평배관 내에서 서로 섞이지 않고 고온 유체는 배관 상단부에 존재하고, 상대적으로 온도가 낮은 저온 유체는 배관의 하단부로 분리된다. 정체된 저온 유체로 유입되는 고온 유체의 유량은 약  $1.26 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{sec}$ 이며, 가압기 밀림관 수평배관의 사양 및 물성치는 Table 1과 같다. 수평배관 주위의 공기온도는  $43^\circ\text{C}$ 로 일정하다고 가정하였고, 열전달계수는 배관의부에 단열재가 설치되어 있는 경우에 배관 단열재 외부와 공기 사이의 실제 허용 열전달계수이다.

무차원 지배방정식 및 경계조건에 나타난 수평배관 내 열성층 유동 현상을 지배하는 무차원수는  $Gr$ ,  $Re$ ,  $Pr$  및  $Bi$  등이며 발전소 가열시 조건을 대입하여 구한 무차원수 및 계산에 사용된 관련 변수들의 값을 Table 2에 나타내었다.

**Table 1** Design specification of surge line<sup>(16,17)</sup>

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

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

Dimensionless No.	Value
$Gr$	$1.938 \times 10^{10}$
$Re$	$1.199 \times 10^5$
$Pr$	1.1712
$Bi$	$1.87 \times 10^{-3}$
$Ri$	1.35
$T_\infty$	$-9.94 \times 10^{-2}$
$a$	0.31
$a_s/a_j$	22.2
$k_s/k_j$	22.65

이러한 열성층현상은 무차원수인  $Ri$  수의 값에 따라 주어진 조건에서의 발생 여부를 판별하며,  $Ri$ 수는 부력에 의한 자연대류영향을 나타내는 무차원수인  $Gr$  수 및 유동속도에 의한 관성력을 나타내는 무차원수인  $Re$  수의 비로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ri = \frac{g \beta \Delta T^* r_i^*}{(u_{hot}^* - u_{cold}^*)^2} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (14)$$

열성층유동이 일어나는 최소한의  $Ri$  수는 0 이상이며, 유체가 열적으로 안정된 성층화되기 위한  $Ri$  수는 1 이상이다. 열성층현상 발생조건을  $Re$  수에 따른 실험결과<sup>(15)</sup>를 살펴보면 수평배관에서 열성층현상의 발생조건은 다음과 같다.

$$Ri \geq \left(\frac{Re}{10^3}\right) \quad \text{at } Re \leq 10^3 \quad (15)$$

$$Ri \geq 1 \quad \text{at } Re \geq 10^3 \quad (16)$$

연구 대상 원자력발전소의 운전조건에서 계산된 Table 2의  $Re$  및  $Ri$ 를 상기의 조건과 비교하여 보면,  $Re$ 는  $10^3$ 보다 큰 경우에  $Ri$  수가 1보다 커야 한다는 식 (16)의 조건을 만족하므로 대상 발전소의 주어진 조건에서 열성층현상이 발생하는 것으로 판단된다.

#### 4.1 열유동 특성

배관 외부 가열의 경우의 주어진 가정에 따라 열성층현상의 변화를 수치해석하고 등온선과 유선 분포의 시간에 따른 변화를 외부가열이 없는 경우<sup>(13)</sup>와 비교하였다. Fig. 3에서 각 시간대의 위 그림은 외부 가열이 없는 경우이고 아래 그림은 외부가열이 있는 경우이다. 우측 반원은 유동 분포를 나타내며 좌측 반원은 등온선 분포를 나타내는데, 등온선 분포의 최대값, 최소값 및 각 변수의 간격을 나타내는 표시로 [최대값(간격) 최소값] 형태의 기호로 나타낸다.

Fig. 3의 (a) (b) 및 (c)는 초기에 저온 유체로 채워진 수평배관 내부에 고온유체가 유입되기 시작하여 무차원 시간 25.0인 시점, 열성층 경계면이 배관 상단부에서부터 수평배관 단면적의 절반위치 ( $\theta = \pi/2$ )까지 수위가 도달하고 외부가열이 제거되는 무차원시간 88.25인 시점 및 초기의 고온 유체가 유입된 후 무차원 시간 150.0이 경과한 시점에서 온도 및 유동분포를 비교한다.

무차원시간 88.25 시간까지는 외부 가열의 열원

이 배관 내벽까지 전도되지 않아 배관 상부와 내부 유체의 등온선과 유선의 분포가 동일하지만 외부 가열원이 내부의 저온 유체로 전달되는 무차원 시간 150에서는 등온선과 유선의 분포가 달라지기 시작한다. 무차원 온도 0.1에서 0.8까지의 등온선 폭이 넓어졌고 유체 상하부의 온도차가 작아져서 상부의 고온 유체가 쉽게 아래로 하강하여 혼합됨을 알 수 있다.

외부가열원이 제거되고 무차원 시간 661.75 경과한 Fig. 3(d)(무차원 시간 750)에서는 외부 가열에 의해 온도가 상승하였던 배관의 아래 부분에 열원이 제거되었기 때문에 외부 공기에 의해 냉각된다. 배관 아래 부분은 냉각되기 시작하지만 내부 저온 유체는 외부가열의 영향이 남아 있어 하부 유동장에 유선이 존재한다.

외부가열에 의한 하부 유동장의 유선은 무차원 시간 2,250에서 완전히 사라지고 무차원 시간

9,000에서는 상부의 순환 유선도 없어져 고온과 저온의 유체가 혼합되어 열성층현상이 완전히 사라진다. 외부가열이 없는 경우에는 상부 유체의 순환 유선이 없어지는 시점이 무차원 시간 12,000이었으므로 외부가열이 있는 경우가 상대적으로 25% 빨리 열성층현상이 사라진다. 온도분포를 비교하여 보면 무차원 시간 12,000에서 내관 벽의 온도차가 거의 없어져 등온선 0.3, 0.2, 0.1이 남았던 것이 외부가열 후에는 등온선 0.2와 0.1만 남았다.

#### 4.2 온도 분포 특성 비교

배관 내외 벽면의 상단부( $\theta=0$ )와 하단부( $\theta=\pi$ ) 및 고온 유체와 저온 유체의 시간변화에 따른 온도차를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 외부가열이 없어 배관 내벽의 최대 온도차는 외벽면과 동일하고 Fig. 4(b)는 외부가열이 있어 내벽과 외벽의 온도차 변화의 모양이 달라진다.

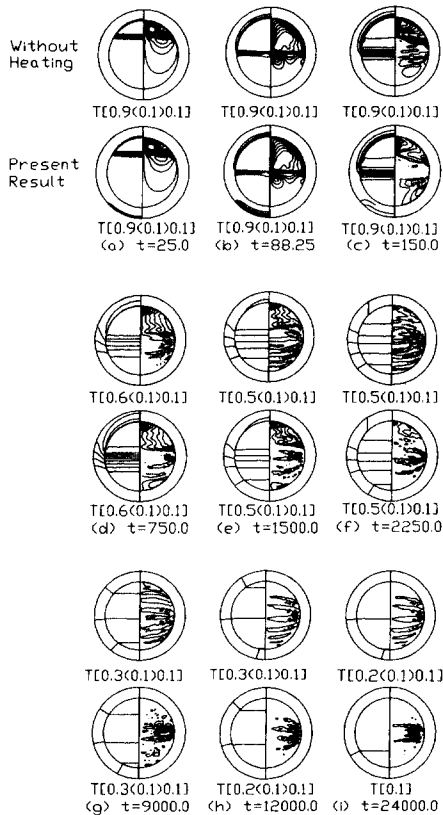


Fig. 3 The comparison of isotherms(Left) and streamline(Right) between without heating<sup>(13)</sup> and present result

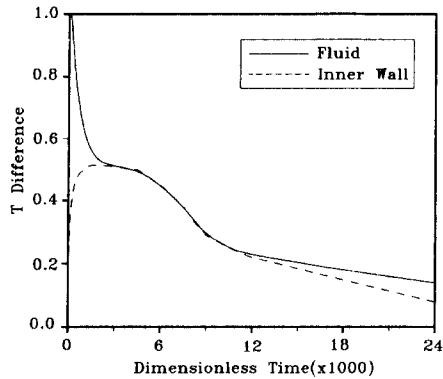


Fig. 4(a) The temperature difference of fluid and pipe inner wall without heating<sup>(13)</sup>

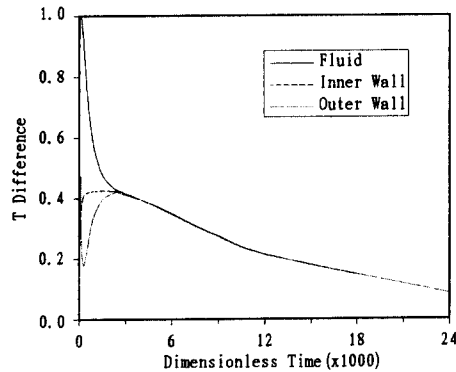


Fig. 4(b) The temperature difference of fluid and pipe inner, outer walls with external heating

무차원시간 88.25까지는 외부가열이 있는 배관 외벽면의 무차원 온도차가 0.472까지 증가한다. 외부가열이 중단된 이후에 무차원시간 250까지 외벽면의 온도차가 0.180으로 감소하는 이유는 고온 유체의 유입에 의해 상단부의 온도가 상승하여 하단부와의 온도차가 줄었기 때문이다. 무차원시간 250에서 2,500까지 외부 벽면의 온도차가 커지는 것은 하단부는 외부로 열전달하여 온도가 감소하기 시작하고 상단부는 고온 유체로부터의 열전달로 온도가 계속 상승하기 때문이다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 외부가열이 없는 경우와 있는 경우의 배관 내벽 상, 하단부 및 유체의 무차원 온도차를 비교한 것으로서 외부가열에 의한 열성층현상 완화 효과를 알 수 있다.

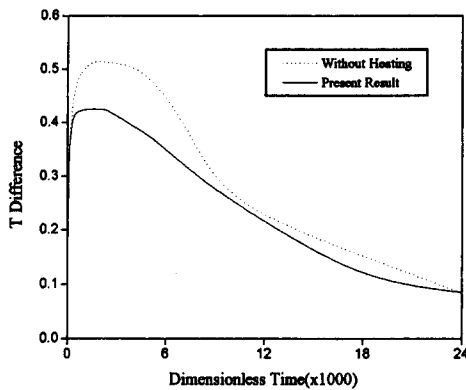


Fig. 5(a) The comparison of the pipe inner wall temperature difference between without heating<sup>(13)</sup> and present result

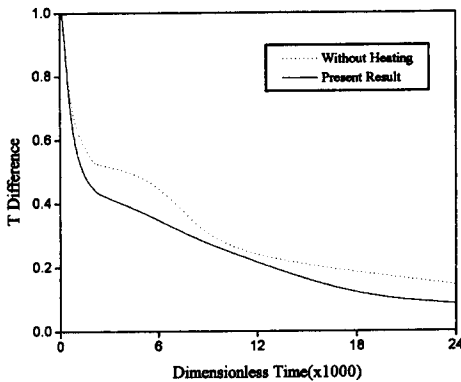


Fig. 5(b) The comparison of the fluid temperature difference between without heating<sup>(13)</sup> and present result

외부가열이 없는 경우에는 무차원시간 1,632에서 배관 내벽의 최대 무차원 온도차가 0.514이었으나 외부가열이 있는 경우에는 무차원시간 1,500에서 최대 무차원 온도차가 0.426이다. 이와 같이 배관 내벽의 최대 무차원 온도차 17.1% 감소는 배관 열응력의 감소로 가압기 밀립관의 기계적 건전성을 향상시킨다. 이는 내부 열성층 유동 현상이 완화되었기 때문이다.

열성층현상 유발의 직접적인 원인이 되는 유체의 최대 온도차도 무차원시간 6,000에서의 무차원 최대 온도차가 0.449에서 0.348로 22.5% 감소하였다. 외부가열이 있는 경우가 빨리 유체 온도차를 줄여주는 것을 알 수 있고 이는 하단부 가열로 저온 유체의 온도 상승, 고온, 저온 유체의 온도차

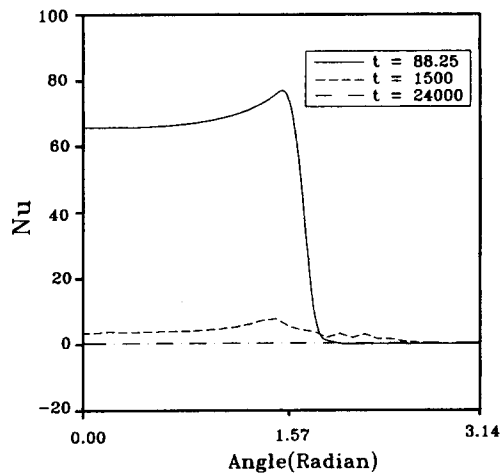


Fig. 6(a) The local nusselt number along the pipe Inner wall of without heating<sup>(13)</sup>

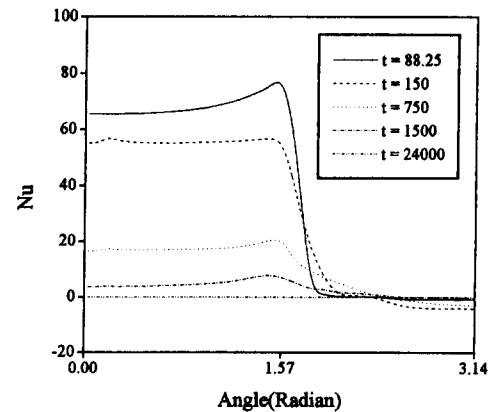


Fig. 6(b) The local nusselt number along the pipe inner wall of external heating

및 밀도차 감소에 의한 열성층현상을 완화하는 효과를 유발한다.

### 4.3 열전달률 특성 비교

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

$$Nu = \frac{hr_i^*}{k} = -\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_o} \quad (17)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{hr_i^*}}{k} = \frac{1}{\pi} \int_0^x Nu \, d\theta \quad (18)$$

무차원 시간대별 배관 내벽에서의 국소 열전달률을 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 비교하였다. 무차원 시간 88.25인 경우에는 두 경우 모두 배관 상부에서 고온 유체와 배관 내벽과의 온도차가 크므로 국소 Nusselt 수가 크게 나타난다. 외부가열의 고온 유체의 최대 열전달률이 외부가열이 없는 경우보다

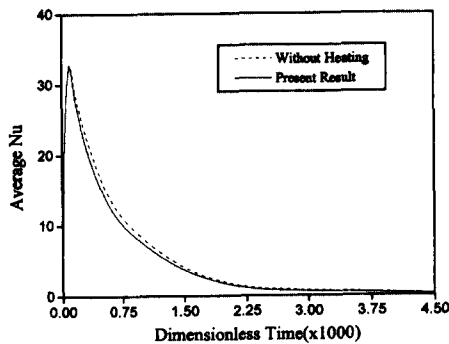


Fig. 7(a) The comparison of the mean nusselt number with time between without heating<sup>(13)</sup> and present result

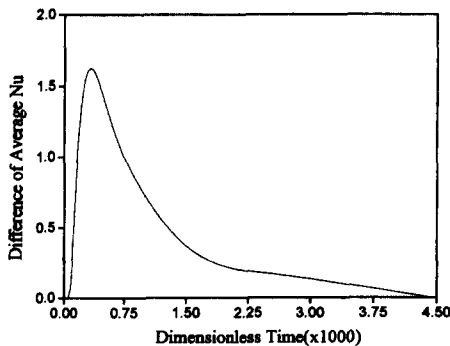


Fig. 7(b) The difference of the mean Nusselt number with time between without and external heating

약간 높고 배관 윗부분 ( $0 < \theta < \pi/2$ )에서 대부분의 열전달이 일어난다.

그러나 외부가열의 경우, 무차원시간 150과 750에서는 외부가열이 있는 배관 하단부 내벽면에서의 열전달 방향이 바뀌어 Nusselt 수가 음(-)의 값으로 계산된다.

Fig. 7(a)은 시간변화에 따른 배관 내벽 전체에서의 열전달 효과를 분석하기 위하여 평균 Nusselt 수 ( $\overline{Nu}$ )의 분포를 비교하였다. 열성층 경계면의 위치가 배관단면의 절반에 도달하는 무차원시간 88.25까지는  $\overline{Nu}$ 이 급격하게 증가하지만 이 시간 이후부터 배관 내벽의 온도차가 가장 커지는 무차원시간 1,500까지 급격하게 감소한다. 두 경우의  $\overline{Nu}$  변화를 살펴보면 내부 벽면에서 외부가열의 영향을 받지 않는 무차원시간 88.25까지는 변화가 없으나 그 이후에는 외부가열에 의한 배관 아래 부분의 (-)Nusselt 수의 영향으로  $\overline{Nu}$ 가 작아지고 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 무차원시간 250에서  $\overline{Nu}$ 의 차이가 1.846으로 가장 크다. 이는 외부가열에 의한 배관 아래 내벽에서 내부 저온 유체로의 전열량 크기를 의미하며 배관 외벽에서 내벽까지 전도에 의한 열전달 지연 시간의 영향으로 무차원시간 250에서 최대  $\overline{Nu}$  차이가 나타난다.

## 5. 결론

가압경수로형 원전의 가열시에 가압기 밀림관의 수평배관 내에 발생하는 열성층현상을 완화하기 위하여 배관 아래 부분을 외부에서 가열하는 방안을 제안하였다. 열성층현상의 완화 정도를 분석하기 위하여 시간변화에 따른 배관벽 및 배관내부의 유체 유동 및 온도 분포를 계산하는 2차원 비정상 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 가열하지 않는 경우의 열유동현상과 비교하여 외부가열 방식에 의한 열성층현상의 완화 정도에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상부 고온 유체의 순환 유선과 하부 저온 유체의 유선이 없어지면서 고온 유체와 저온 유체가 혼합되어 열성층현상이 사라지는 무차원시간이 9,000으로서 외부가열이 없는 경우보다 25% 빨라졌다.

(2) 동일 시간에서의 등온선 분포도 외부가열의 경우가 넓게 나타나 외부가열이 없는 경우보다 열확산성이 크다.



(3) 배관 내벽의 상하단부 최대 무차원 온도차가 무차원시간이 1,632에서 0,514이던 것이 무차원 시간 1,500에서 0,424로 온도차를 17.1% 감소시킬 수 있다. 무차원시간 6,000에서 유체의 최대 온도차도 0,449에서 0,348로 22.5% 감소하였다.

(4) 외부 가열이 있는 동안에 배관 아랫부분 내벽면에서의 국소 Nusselt 수는 (-)으로 계산되고, (-)Nusselt 수의 영향으로 외부가열의 경우의  $\overline{Nu}$ 가 상대적으로 작다.  $\overline{Nu}$ 의 차이는 무차원시간 250에서가 1.846으로 가장 큰 값을 나타낸다.

본 연구에서 수평배관 내부의 열성층유동을 완화하기 위한 외부가열 방법의 유용성을 확인하였으므로 이를 발전시키고 현장적용하기 위하여는 외부가열 형태 및 최적조건 도출을 위한 parametric 수치해석, 외부가열 시스템 설계 및 성능실험 등의 후속 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- (1) Turner, J. S., 1979, *Buoyancy Effects in Fluid*, Cambridge University Press, Chapter 1, p. 1.
- (2) Nuclear Regulatory Committee, 1988, "Thermal Stress in Piping Connected to RCS," *NRC Bulletin* No. 88-08.
- (3) Nuclear Regulatory Committee, 1988, "Pressurizer Surge Line Thermal Stratification," *NRC Bulletin* No. 88-11.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Wolf, L., Hafner, W., Geiss, M., Hanjostan, 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.
- (7) Kim, J. H., Ridt, R. M. and Deardorff, A. F., 1993, "Thermal Stratification and Reactor Piping Integrity," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 139, pp. 83~95.
- (8) Smith, W. R., Cassel, D. S. and Schlereth, E. P., 1988, "A Solution for the Temperature Distribution in a Pipe Wall Subjected Internally Stratified Flow," *Proceeding of 1988 Joint ASME-ANS Nuclear Power Conference*, pp. 45~50.
- (9) Ensel, C., Clas, A. and Barthes M., 1995, "Stress Analysis of a 900MW Pressurizer Surge Line Including Stratification Effect," *Nuclear Engineering and Design* 153, pp. 197~203.
- (10) Ahn, J. S., Ko, Y. S., Kim, Y. H., Park, B. H. and Kim, E. K., 1995, "Analysis of the Circumference Wall Temperature in a Long Horizontal Pipe with Thermal Stratification," *Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, pp. 364~370.
- (11) 염학기, 박만홍, 정일석, 1995, "가압기 서지 라인의 수평배관 내 열성층유동 수치해석," 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술대회, 제주대학교.
- (12) Youm, H. K., Park, M. H. and Kim, S. N., 1996, "The Unsteady 2-D Numerical Analysis in a Horizontal Pipe with Thermal Stratification," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Volume 28, Number 1, pp. 27~35.
- (13) 정일석, 김 유, 염학기, 박만홍, 1996, "가압기 밀림관의 수평배관 내 열성층유동," 대한기계학회 논문집 (B) 제20권, 제4호, pp. 1449~1457.
- (14) Patankar, V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company.
- (15) 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*.
- (16) ASME B 31.1 and Sec. II, 1992 Edition.
- (17) ASTM A 376/A376M-91a.