

<논 문>

수평급수배관 내에서의 비정상 열성층유동 및 열전달

염학기* · 박만홍*

(1995년 6월 16일 접수)

Unsteady Thermal Stratified Flow and Heat Transfer in a Horizontal Feedwater Pipe

H. K. Yeom and M. H. Park

Key Words : Thermal Stratification(열성층), Horizontal Pipe(수평배관), Feedwater line(급수 배관), Feedwater System(급수계통)

Abstract

In this paper, the unsteady state calculational model is proposed for the thermal stratification analysis in the feedwater line of the PWR plant. By defining dimensionless parameters in the two-dimensional polar coordinate system and applying SIMPLE algorithm, the temperature and flow profiles due to the thermal stratification are obtained. Base on the fact that the most significant condition occurs when the fluid temperature difference between the piping ends reaches as high as 166°C, the present result shows that max. dimensionless temperature difference of 0.6 (about 100°C) obtained between hot and cold sections of pipe wall at dimensionless time 47.0.

기 호 설 명

a : 벽면두께
 Bi : Biot 수
 C_1, C_2 : 확산계수
 Cp : 비열
 g : 중력가속도
 Gr : Grashof 수
 h : 열전달계수
 k : 열전도계수
 Nu : Nusselt수
 P : 압력
 Pr : Prandtl수
 r : 반경방향
 Re : Reynolds수
 Ri : Richardson수
 T : 온도

t : 시간
 U_o : 축방향의 기준속도
 u, v : θ 및 r 방향 속도
 α : 열확산계수
 β : 열팽창계수
 θ : 원주방향
 ϕ : 유량함수
 ρ : 밀도

하첨자

f, s : 유체 및 고체영역
 $hot, cold$: 고온 및 저온영역
 i, o : 내부 및 외부벽면 또는 기준값
 ∞ : 외부

상첨자

m : 반복횟수
 $*$: 유차원값

— : 평균값

*회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

1. 서 론

원자력발전소의 시운전(startup operating) 및 고온 대기운전(hot standby operating) 등과 같은 천이운전시에 주급수계통 및 원자로 냉각재계통과 연결된 보조계통의 배관들에 대한 최근의 온도측정 결과, 고온유체와 저온유체가 층을 이루고 있는 열성층(thermal stratification) 현상이 존재하고 있는 것으로 보고되었다. 이에 따라 미국의 NRC(Nuclear Regulatory Commission)는 기존의 원자력발전소뿐만 아니라 설계중인 원자력발전소에 대해서 이와 같은 배관들을 대상으로 열성층현상의 존재여부 검토 및 해석을 수행하여 배관의 건전성을 확인 및 확보하도록 NRC Bulletin 88-11⁽¹⁾에 고시하였다. 이러한 열성층현상에 의해서 발생된 응력들은 기존의 배관설계시에 배관에 작용하는 하중들에 포함시키지 않았으나, 최근의 실험 및 해석 연구 결과^(2,3)들에 의하면 열성층현상이 배관의 균열 및 배관지지대에 많은 하중을 주어 불필요한 변위를 발생시키는 주요원인으로 판명되었다.

열성층현상을 해석하기 위해서 몇개의 원자력발전소를 대상으로 열성층현상 및 영향 등에 관한 측정 및 간단한 정상상태 일차원 및 2차원 해석^(4,5) 등을 수행하였고 이에 따라 일부 발전소의 설계에 열성층현상에 의한 열응력을 반영하고 있다. Dhir 등^(6,7)은 수평배관 양단의 온도가 다른 경우, 자연대류에 의한 열성층 해석을 수행하기 위해서 배관의 유동현상을 1차원 모델로 가정하여 해석적인 연구를 수행하였고, Smith 등⁽⁸⁾은 배관의 온도분포를 구하기 위해서 1차원 핀모델을 적용하여 해석적인 방법으로 구한 결과를 ANSYS 코드의 해석결과와 비교검토를 수행하였다.

국내에서는 이근성⁽⁹⁾이 YGN 3, 4호기 밀림관(surge line)을 모사한 열성층현상에 대한 실험을 수행하였으며, 안장선⁽¹⁰⁾은 YGN 3, 4호기 가압기 밀림관을 대상으로 열성층현상의 주요인자인 배관의 벽면두께 및 열전달계수 등의 영향에 대한 분석을 위하여 정상상태 2차원 수치해석을 수행하였다.

지금까지 열성층현상과 관련된 대부분의 해석방법들은 배관에서 최대 열응력을 발생시킬 것으로 예상되는 유체 및 배관의 온도분포를 가정하여, 열성층현상 발생에 따른 배관의 응력해석을 수행하였지만, 배관벽을 포함한 배관내부의 유체에 대해 시

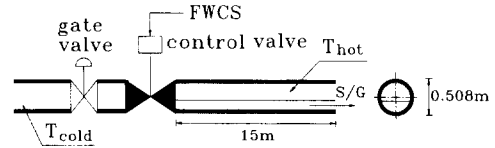


Fig. 1 Thermal stratification in a horizontal pipe of feedwater system

간변화에 따른 유동 및 열전달현상을 고려한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 수평급수배관에서 밸브에 의해 양단으로 분리된 고온 및 저온유체가 온도 및 압력차에 의해 잠겨있는 밸브에서 누설이 발생하는 경우, 밸브전단의 저온유체가 밸브 후단에 정체되어 있는 수평배관의 고온유체로 점차 유입되어 시간에 따라 저온유체의 수위가 배관하단으로부터 점차 상승하여 최대 열응력이 예상되는 배관 중앙부근까지 변화하며 열성층현상이 발생할때, 배관 및 내부유체에서의 유동 및 열전달현상을 수치적인 방법으로 연구하였다.

2. 이론해석

원자력발전소에서 증기발생기의 열효율을 증가시키기 위해서 증기발생기 2차측 급수배관을 하향(downcomer) 급수관과 급수재열기(economizer) 급수관으로 분리하여, 각 급수관을 통해 출력에 따라 증기발생기로 공급되는 급수유량비를 변화시키는 방법이 적용되고 있다. 이 방법에서 갑자기 발전소 운전중 원자로 출력이 100%에서 20% 이하로 급격하게 감소하게 되면, 급수가열기 급수관의 급수제어 밸브 후단 수평배관 내에서는 다음과 같은 과정으로 열성층현상이 발생한다. 정상출력시 급수가열기 및 하향 급수관을 통하여 증기발생기로 공급되던 급수온도가 약 232℃에서 약 66℃로 감소하여, 급수가열기 급수밸브는 잠기게 되고 단지 하향급수관을 통해서만 증기발생기로 급수가 이루어진다. 이때, 급수가열기 급수제어 밸브의 수평배관 전후단에는 12.8 Kgf/cm²의 압력차가 발생하며, 밸브 전단에는 66℃, 밸브 후단에는 232℃의 온도를 갖는 급수가 급수가열기 급수제어 밸브에 의해서 격리되어 밸브 전후단의 수평배관 내부에 존재한다. 그러나 급수가열기의 급수제어 밸브는 최대 누설률이 1.45×10⁻² m³/sec⁽¹¹⁾로 설계

되어 있어, 약 66 °C의 저온급수가 약 232 °C의 고온급수로 채워진 배관내로 유입되기 때문에 급수가 열기 급수제어 밸브의 후단측 수평배관에서는 Fig. 1과 같이 열성층현상이 발생한다. 이와 같이 밸브에서 저온유체의 누설로 인하여 밸브 후단의 수평배관 내에서 열성층현상이 발생하는 경우, 유체 및 배관에서의 유동 및 온도분포를 해석하기 위해서 Fig. 2와 같이 수평배관 원형단면의 반경 및 원주 방향을 r 및 θ 좌표로 한 계산 모델을 선정하고, 열성층현상이 원형 단면에서 대칭으로 나타난다는 가정하에 원형 단면의 반만을 계산영역으로 하는 비정상 2차원 열유동해석을 수행하였다.

수평배관 내에서 유체온도차에 의해 발생하는 열성층현상을 해석하기 위해서, 물리적인 현상을 나타내는 지배방정식들을 다음과 같은 가정들을 적용하므로써 단순화하였다.

- 고온 및 저온유체는 비정상 상태 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.
- 고온 유체로 채워진 배관내에 일정한 유량의

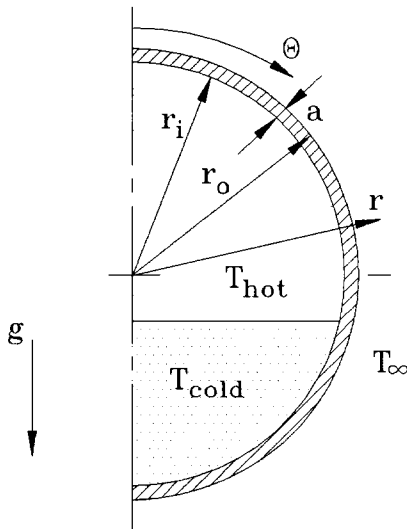


Fig. 2 Schematic diagram of calculation domain

저온유체가 배관하부로 유입되어 형성되는 열성층 경계면의 위치는 시간에 따라 변화하지만 열성층 경계면이 일정한 위치 ($\theta_0 = \pi/2$)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.

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

기준속도 U_o 는 수평배관의 길이 방향으로 급수 제어 밸브를 통하여 수평급수배관으로 유입되는 저온유체의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 유동이 2차원이라고 가정하였지만 저온유체의 유입속도에 따라 유동형태가 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.

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

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

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

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

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.

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

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

무차원화된 초기 및 경계조건은 아래와 같다.

- 초기조건 ($t=0$)

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

- 경계조건 ($t>0$)

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

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

$$r=1 \quad k_f \frac{\partial T}{\partial r} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \quad (11)$$

3. 수치해석 방법

지배방정식은 비선형 편미분방정식의 형태이며 이를 수치해석하기 위해서 Patankar⁽¹²⁾의 제어체적 방법에 의해 이산화시켰으며, 유도된 이산화방정식은 반복계산법에 의해 해를 구하였다. 본 수치해석에서는 선순법(line by line method)에 의한 TDMA를 이용하고, SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Link Equations) 알고리즘을 적용하여 이산화방정식에서 속도, 압력 및 온도장을 구하였다.

계산모델에 대한 격자수는 $r-\theta$ 방향으로 62×42 로 선정하였다. 여기서, θ -좌표에서는 격자배치를 균일하게 배치하였으며, r -좌표에서는 배관의 중

심부 보다는 배관벽면의 근처부분에서 유동현상 및 배관벽에서의 온도분포가 관심의 대상이기 때문에 배관내부의 유체영역을 세부분으로 나누어서 각 영역내에서는 격자를 균일하게 배치하였으나, 배관벽면에 가까운 유체영역일수록 격자를 세밀하게 배치하였다. 또한, 배관벽에서는 유체영역의 경우보다 더욱 세밀하게 격자를 배치하였다.

본 연구에서 적용된 시간간격은 여러가지 시간간격에 대한 계산결과를 비교 검토하여 초기에는 무차원 시간간격을 0.1로 선정하였으며, 열성층 경계면이 일정한 위치에 도달하여 열성층 경계면이 변화하지 않을 때부터 어느 정도 유동 및 온도분포가 안정된 상태에 도달할 때까지를 계산하였다. 그리고, 그 이후의 시간부터 정상상태에 도달할 때까지는 계산량을 줄이기 위해서 시간간격의 변경에 따른 각 중요변수의 값을 비교검토한 후에 무차원 시간간격을 1.0으로 선정하여 계산하였다.

수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위해서 하향 이완계수를 사용하였다. 초기에 수위가 변화하는 시간 및 어느 정도 유동분포가 안정되지 않을 때는 수치해가 발산하는 것을 방지하기 위해 속도 및 압력 등의 이완계수들을 0.08 이하로 선정하였고, 온도에 대해서는 0.15로 하였으며, 그 후에는 속도 및 압력 등의 이완계수는 0.35, 온도에 대해서는 0.55로 선정하여 계산하였다.

각 시간간격에서의 반복횟수는 초기에 약 200회 정도의 반복계산 후에 수렴되었고, 시간이 경과함에 따라서 반복횟수는 점점 감소하였으며, 정상상태에 가까워지면 15회 이하에서 수렴되었다. 해의 수렴은 1회 반복계산마다 열평형을 조사하여 그오차가 0.01% 이하이고, 다음식과 같이 각 변수들의 오차가 허용범위 이내로 계산되면 수렴한 것으로 판정하였다.

$$\left| \frac{\phi^{m+1} - \phi^m}{\phi^m} \right| < 10^{-3} \quad (12)$$

수치해석 프로그램을 검증하기 위해서, HDR-Facility의 열성층현상 실험⁽³⁾에서 온도분포 측정결과 및 본 프로그램에 HDR-Facility 모델을 적용하여 구한 해석결과를 Fig. 3에 비교검토하였다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 경계면 부근의 온도분포가 약간의 차이를 나타내지만 전체적인 온도분포들이 실험값 및 계산결과가 전체적으로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있으며, 이를 바탕으로 본 계산을

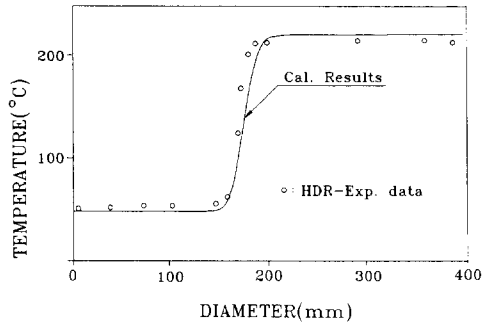


Fig. 3 The comparison between HDR – Experiment⁽³⁾ and our results

수행하였다.

4. 결과 및 고찰

계산모델을 해석하기 위한 무차원 지배방정식 및 경계조건을 살펴보면, 수평배관내 열성층유동 현상을 지배하는 무차원 수는 Gr 수, Re 수 Pr 수 및 Bi 수 등이다. 실제 수평급수배관에 설치된 배관의 사양 및 물성치는 Table 1과 같다. Table 1에 나타난 열전달계수는 배관에 단열재가 설치된 경우의 배관 표면과 외부공기와의 설계허용 열전달계수이다.

위의 조건들을 대입하여 구한 무차원 수를 살펴보면 $Gr=1.5 \times 10^{11}$, $Re=7.424 \times 10^3$, $Pr=1.7084$ 및 $Bi=5.39 \times 10^{-4}$ 이다. 이 외에 무차원 주위온도 $T_o=-1.354 \times 10^{-1}$, 무차원 벽면두께 $a=0.176$, 열확산계수비 $\alpha_s/\alpha_f=89.3$ 및 열전도계수비 $k_s/k_f=81.5$ 등이 계산에 필요하다. 또한 밸브의 최대 누설률과 배관 단면적을 고려하면 저온유체가 일정한 속도로 유입되어 배관의 하단에서부터 수평배관 단면적의 절반까지 도달하는 무차원 시간은 약 0.6정

Properties & spec.	Value
O. D of pipe	0.508 m
Thickness of pipe	0.038 m
Material of pipe	Seamless Carbon Steel ASTM A 106 Grade B
Conductivity	55.665 W/m ² C
Heat transfer coef.	0.79 W/m ² C
Ambient temp.	43 °C

도 소요된다.

본 연구에서는 위의 조건들을 고온유체로 채워진 수평배관내에 저온유체가 시간에 따라서 점차 유입되어 수위가 변하여 일정한 위치 ($\theta_0=\pi/2$)에 도달하고, 그후 수위가 일정하게 유지되면서 정상상태에 이르기까지의 시간변화에 따른 수평배관 내부의 열성층현상 및 배관의 온도분포의 변화를 해석하였다.

4.1 유동 및 온도분포

Fig. 4는 출력이 급격하게 감소될 때 잠겨진 급수제어 밸브의 누설로 인하여 고온유체로 채워진 배관내부에 저온유체가 유입되기 시작하여 수위가 배관의 단면적 절반까지 채워지는 무차원 시간까지인 0.1, 0.3 및 0.6인 경우의 유동 및 온도 분포를 나타내었다. 그림에는 각 변수에 대한 계산결과와 최대값 및 최소값을 나타내었으며, 그림에서 보여주는 유선 및 등온선 분포의 최대값, 최소값 및 각 변수의 간격을 나타내는 표시로 [최대값(간격)최소값]형태의 기호로 나타내었다.

정지되어 있는 고온유체에 약 1.45×10^{-2} m/sec

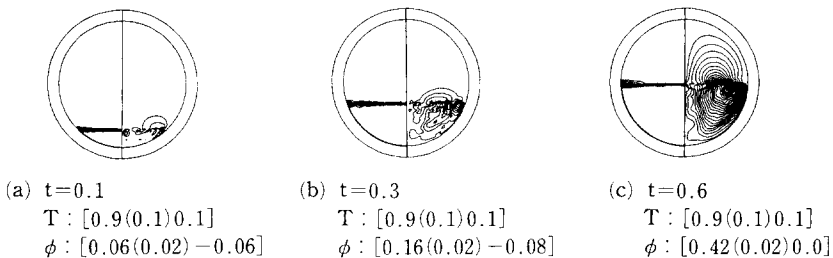


Fig. 4 Distribution of isotherms (left) and stream lines (right)

($Re=7.424 \times 10^3$)의 속도로 저온유체가 유입되어 시간이 경과함에 따라 배관 내부의 저온유체 수위가 점점 높아져 무차원 시간 0.6만에 배관 단면적의 절반위치($\theta_0=\pi/2$)에 도달하고, 그 이후부터 시간이 지나도 더 이상은 수위가 증가하지 않는 것으로 가정하였다. 그러므로, 무차원시간 0.6 이후부터는 수위가 일정하게 유지되면서 열전달이 진행될 것이다.

Fig. 4의 등온선 분포를 살펴보면, 저온유체가 배관내부로 유입되는 초기단계의 시간에서는 고온유체와 저온유체가 접촉하는 경계면에서 등온선이 집중되어 있고 아직은 저온유체가 배관벽면의 온도분포에 영향을 미치지 못하고 있다. 유선분포는 초기에 급격하게 배관내부로 저온유체가 유입되므로 아주 복잡한 유동형태로 나타나며, 고온유체 영역은 거의 정지되어 있다가 수위가 배관 단면적의 절반위치($\theta_0=\pi/2$)에 도달하는 무차원시간 0.6에서 전체 배관 내부에서 유동의 영향이 나타난다.

무차원시간 0.6 이후에는 배관 내부에서 유체의 수위변화가 시간에 상관없이 일정하게 유지되므로 점차 안정된 유동형태로 나타나는데 Fig. 5에는 무차원 시간이 각각 17.5, 23.5 및 47.0가 경과하였을 경우의 유동 및 등온선 분포를 나타내었다. 초기에 고온 및 저온유체가 만나는 경계면에 집중되어 있던 온도분포는 점차 배관 내부의 유체로 열전달이 일어나서 전형적인 열성층현상의 온도분포 형태가 나타난다. 배관 내부의 저온유체 온도가 배관벽의 내부까지 열전달이 이루어져 배관벽에서도 열성층현상에서 나타나는 전형적인 온도분포가 나타난다. 배관내부 유체의 상단부에서도 점차 자연대류에 의한 열전달이 이루어져 고온 유체부분에서 저온유체의 영향으로 성층화된 온도분포가 나타난다. 배관내벽과 유체경계에서의 온도분포를 살펴보면, 유체와 접하고 있는 배관벽면의 온도분포는 성층화된

유체에서의 등온선과 바로 이어져서 나타나지 않고 배관내 벽면을 따라 하향 또는 상향방향으로 이동하여 나타난다. 이것은 유체와 배관사이의 r -방향 열전달보다 고체부분인 배관벽에서의 θ -방향으로 열전달이 더 많이 일어 나기 때문이다. 또한, 하단부에서는 배관벽과 유체사이의 온도차가 크고, 배관 외부가 단열체로 처리되어 있어 배관 외부로의 열방출량보다 유체에서 배관벽으로의 열전달량이 많기 때문에 배관벽 하단부에서 배관벽을 따라 등온선이 경사지게 나타나지만, 상단부에서는 온도차가 하단부보다 크지 않기 때문에 등온선은 r -방향으로 평행하게 나타난다.

시간변화에 따른 배관내부 유체의 무차원 최저온도는 무차원 시간 8.2에서 0.1, 무차원 시간 15.2에서 0.2, 그리고 무차원 시간 35.2에서는 0.3이상이 되며, 시간이 경과함에 따라 자연대류현상으로 인하여 서서히 고온 및 저온유체가 혼합되어 온도차는 점점 작아진다. 그러나, 배관으로는 어느 정도의 시간이 경과되어야 유체로부터 벽면으로 열전달이 이루어지고 고온유체의 온도와 동일한 온도를 유지하던 배관벽에 저온유체의 영향에 따른 온도분포가 나타난다. 배관벽에서는 무차원 시간 23.5 정도의 시간이 경과하면서부터 온도차가 점점 커지고, 무차원 시간이 약 47.0 정도에서 최대온도차가 나타난다. 이때의 무차원 최대 온도차는 약 0.6 정도로 나타나고, 이 시간대에서 배관벽면에 최대 열응력(thermal stress)이 발생할 것으로 예상된다. 배관내부 유동은 시간이 지남에 따라서 유동이 점차 안정되어 정상상태의 유동현상이 나타나서 r 및 θ -방향의 원통 단면에서의 유동은 아주 미미하게 나타난다.

수평단면의 $\theta=0, \pi/3, 2\pi/3$ 및 π 위치에서 시간변화에 따른 배관내벽 및 배관내부 유체영역 중간부분의 온도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 배관 외

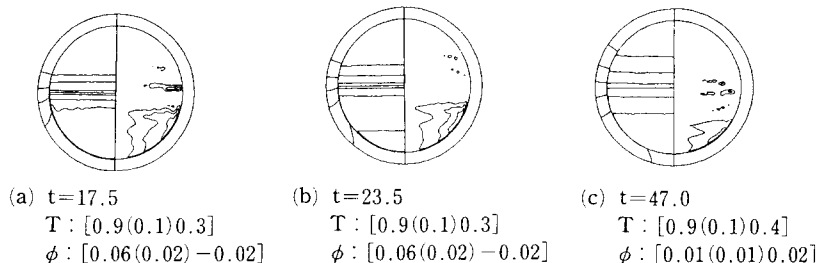


Fig. 5 Distribution of isotherms (left) and stream lines (right)

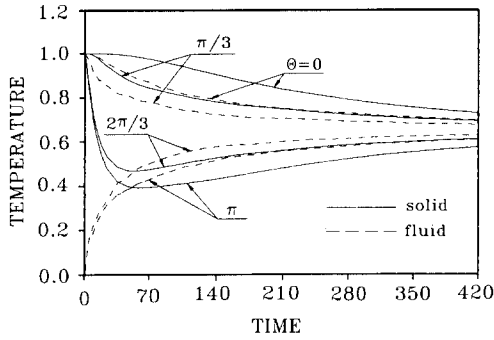


Fig. 6 Temperature distribution of each region with time

벽 및 내벽의 온도분포는 계산된 시간에서 거의 온도차가 나타나지 않기 때문에 Fig. 6에는 배관 내부의 온도분포만을 나타내었다. 단지, $\theta=2\pi/3$ 및 π 위치에서 초기에 고온유체와 같은 온도로 유지되던 배관 내벽 및 외벽의 온도는 저온유체가 유입되는 초기에는 배관내벽의 온도가 배관 외벽의 온도보다 낮아지지만 그 차는 아주 미미하다.

유체의 온도분포를 살펴보면 초기에 저온유체가 배관 하부로 유입되어 배관 단면적의 절반수위까지 채워지는 무차원시간 0.6인 경우에는 $\theta=\pi/2$ 를 중심으로 배관 상부 및 하부에서 고온유체와 저온유체가 완전히 구별되어 나타난다. 이 시간 이후에 배관상부인 $\theta=0$ 및 $\pi/3$ 위치에서 온도분포는 무차원온도가 1.0에서부터 서서히 낮아지고, 배관하부인 $\theta=2\pi/3$ 및 π 위치에서 온도분포는 무차원시간 70.0까지는 급격하게 상승하다가 그 후에는 서서히 상승한다. 또한, 유동이 정상상태에 가까워지면 저온 및 고온유체가 배관 내부에서 자연대류에 의하여 혼합되고, 무차원 평균유체온도는 약 0.65에 접근함을 알 수 있다.

배관벽면의 온도분포를 살펴보면 배관내부의 최상단인 $\theta=0$ 인 위치에서는 무차원 시간 23.5부터 완만하게 온도가 감소하고, $\theta=2\pi/3$ 인 위치에서는 무차원 시간 4.0부터 온도가 감소하기 시작한다. 또한, $\theta=2\pi/3$ 및 π 인 위치에서는 무차원 시간이 0.6이후부터 약 47.0 시간까지 온도가 급격하게 감소하다가 그 이후에는 서서히 상승한다.

전체 계산시간 중에서 배관 내벽의 상단부와 하단부의 온도차가 가장 크게 나타나는 무차원시간은 약 47.0으로 나타났으며, 이때 배관 내벽의 $\theta=0$ 및 π 위치에서의 무차원 최대 온도차가 약 0.6으로

Table 2 Dimensionless temp. and ΔT at each region

	Time	$\theta=0$	$\theta=\pi$	ΔT
Outer wall of pipe	0.6	1.0	0.995	0.005
	47.0	0.992	0.397	0.595
	420.2	0.733	0.571	0.162
Inner wall of pipe	0.6	1.0	0.917	0.083
	47.0	0.993	0.394	0.599
	420.0	0.733	0.571	0.162
Middle region of fluid	0.6	1.0	2.58×10^{-16}	1.0
	47.0	0.910	0.383	0.528
	420.0	0.702	0.603	0.099

나타났다. 따라서, 배관 내부의 하단부로 저온의 유체가 유입되기 시작하여 무차원 시간이 약 47.0 정도 경과한 후에 열성층현상에 의한 열응력이 최대로 나타날 것으로 예상된다.

Table 2에는 Fig. 6에서 나타난 온도분포에서 무차원 시간이 0.6, 47.0 및 420.0일 때, 각 부분에서의 최상단부 및 최하단부의 무차원 온도와 무차원 최대 온도차를 나타내었다.

배관벽에서의 무차원 온도차는 초기에는 거의 없고, 무차원 시간이 47.0일 때 가장 크게 나타나며, 그후 시간이 경과함에 따라 점차 작아진다. 또한 배관 외벽보다는 배관 내벽에서의 무차원 온도차가 약간 크게 나타남을 알 수 있다.

유체의 무차원 온도차는 초기시간 때에 가장 크게 나타나다가 자연대류의 영향에 의하여 점차 작아지며, 최종의 정상상태에서는 고온유체 및 저온유체가 완전하게 혼합되어 무차원 평균온도가 0.65 정도로 나타날 것으로 예상된다.

4.2 열전달량의 분포

배관 내부공간의 원주방향 위치별 열전달효과를 알아보기 위해 다음과 같이 국소 및 평균 Nusselt 수를 정의하였다.

$$Nu = -\frac{dT}{dr} \Big|_{r=r_i} \tag{13}$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi Nu \, d\theta \tag{14}$$

무차원 시간이 0.6, 47.0 및 420.0일 때, 배관 벽면에서의 θ 방향에 따른 국소 Nusselt수를 Fig. 7에 나타내었으며, 그림을 살펴보면 국소 Nusselt수가 대부분 “-” 값으로 나타나는 것은 열전달이 배관 내부로부터 외부로 이루어지는 것을 “+” 방향으로 하였기 때문에 열전달이 대부분 온도가 높은 배관 벽에서 저온유체쪽으로 이루어지기 때문이다.

초기 무차원 시간 0.6일 때, 배관 상단부에는 유체온도와 배관벽의 온도차가 거의 없으므로 국소 Nusselt수가 매우 작게 나타나지만 고온유체 및 저온유체의 경계면에서는 저온유체 및 배관벽 사이의 온도차가 크게 나타나기 때문에 국소 Nusselt수가 급격하게 증가한다. 그리고, 배관 하단부에서는 국소 Nusselt수가 큰 값을 유지하면서 매우 작게 변화한다.

시간이 경과함에 따라 배관 상단부에서의 국소 Nusselt수 분포는 크게 변화하지 않지만 하단부에

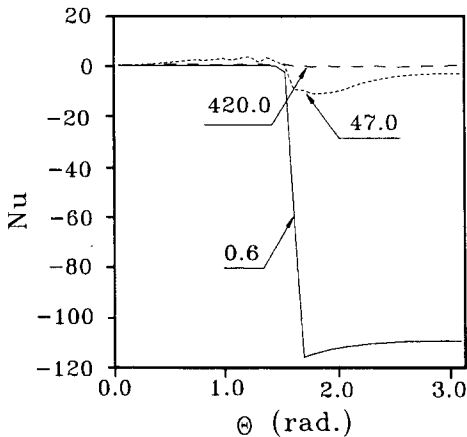


Fig. 7 Local Nusselt no. along inner wall of pipe

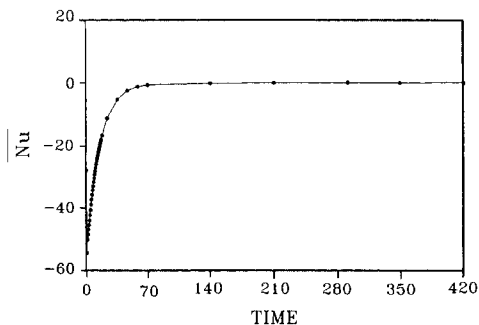


Fig. 8 Mean Nusselt no. of inner wall of pipe with time

서는 저온유체 및 배관내벽의 온도차가 작아져서 국소 Nusselt수가 작아지며, 정상상태에 거의 도달하는 무차원 시간 420.0인 경우에는 고온유체와 저온유체가 혼합되며, 유체 및 배관 내벽과의 온도차가 거의 없어서 열전달량이 아주 작게 나타난다.

Fig. 8은 시간변화에 따른 배관 내벽에서의 평균 Nusselt수를 나타내었는데 전체적으로 배관벽에서 저온유체쪽으로 열전달이 대부분 이루어지기 때문에 평균 Nusselt수 값이 “-”값으로 나타난다.

초기에 수위가 배관 단면의 절반까지 차는 무차원 시간 0.6까지는 평균 Nusselt수가 급격하게 증가하다가 무차원 시간 23.5까지는 급격하게 감소하며, 이 시간 이후부터는 변화율이 매우 작아진다. 이것은 수위가 급속하게 변화하는 초기에 고온유체의 온도와 같은 온도로 유지되는 배관벽에서 저온유체쪽으로 열전달이 많이 이루어지지만 시간이 경과함에 따라서 점차 배관벽과 저온유체 사이의 온도차가 작아지기 때문에 배관벽에서 저온유체로의 열전달량이 작아지기 때문이다.

무차원 시간 70.0이후에는 배관내벽 및 저온유체 사이의 온도차가 거의 없어서 열전달량이 매우 적으며, 무차원 시간 280.0이후에는 배관 내부의 유체온도가 배관벽면의 온도보다 아주 미소하게 높아져서 전체적으로 배관 내부 유체에서 배관 벽쪽으로 매우 작은 열전달이 일어나는 것을 의미하는 것으로 평균 Nusselt수가 매우 작은 “+” 값을 나타낸다.

5. 결론

원자력발전소에서 터빈 출력이 급격하게 감소하여 급수가열기 급수관에 있는 급수제어 밸브 후단의 수평배관에서 열성층현상이 발생하였을 경우, 시간변화에 따른 배관벽 및 배관 내부의 유동 및 온도분포를 수치적으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 배관 단면적의 절반($\theta = \pi/2$)까지 수위가 변화하는 무차원 시간 0.6 동안에는 배관내부의 유동 분포는 아주 복잡하게 나타나며, 배관벽으로의 열전달이 이루어지기에는 짧은시간이므로 저온유체의 온도는 배관벽에 영향을 주지 못한다.

(2) 무차원 시간이 약 47.0일 때, 배관내벽의 상하단부 온도차가 가장 크게 나타나므로 이 시간에 배관 벽면에서 최대 열응력이 나타날 것으로 예상

되며, 이때 무차원 최대 온도차는 0.6이다.

(3) 무차원 시간이 약 420.0 정도 경과하면 자연 대류의 영향에 의하여 고온 및 저온유체가 거의 혼합되어 열성층현상이 거의 사라지며, 이때 배관 내부 유체의 무차원 평균온도는 약 0.65정도이다.

(4) 국소 Nusselt수는 초기 무차원 시간인 0.6에서 고온유체와 저온유체의 경계면에서 급격하게 변화하며 평균 Nusselt수도 가장 크게 나타난다. 또한, 전체적으로 열전달은 온도가 높은 배관에서 저온유체쪽으로 이루어지며, 무차원 시간 280.0이후에는 매우 작기는 하지만 배관 내부의 유체쪽에서 배관 벽면쪽으로 열전달이 이루어진다.

참고문헌

- (1) NRC, 1988, "Pressurizer Surge Line Thermal Stratification," *NRC Bulletin* No. 88~11.
- (2) Talja, A. and Hansjosten, E., 1990, "Results of Thermal Stratification Test in A Horizontal Pipe Line at the HDR-Facility," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 118, pp. 29~41.
- (3) Wolf, L., Häfner, W., Geiss, M., Hansjosten, E. and Katzenmeier, G., 1992, "Results of HDR-Experiments for Pipe Loads under Thermally Stratified Flow Condition," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 137, pp. 387~404.
- (4) Braschel, B., Miksch, M. and Schucktan, 1984, "Thermal Stratification in Steam Generator Feed-Water Lines," *Trans. of the ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 78~85.
- (5) Miksch, M., Lenz, E. and Lohberg, R., 1985, "Loading Condition in Horizontal Feedwater Pipes of LWRs Influenced by Thermal Shock and Thermal Stratification Effects," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 84, pp. 179~187.
- (6) Dhir, V. K., Amar, R. C. and Mills, J. C., 1988, "A One Dimensional Model for the Prediction of Stratification in Horizontal Pipes Subjected to Fluid Temperature Transient At Inlet ; Part 1 : Hydro-Dynamic Model," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 107, pp. 307~314.
- (7) Dhir, V. K., Amar, R. C. and Mills, J. C., 1988, "A One Dimensional Model for the Prediction of Stratification in Horizontal Pipes Subjected to Fluid Temperature Transient At Inlet ; Part 2 : Thermal Model," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 107, pp. 315~325.
- (8) Simth, W. R., Cassell, D. S. and Schlereth, E. P., 1988, "A Solution for the Temperature Distribution in a Pipe wall Subjected to Internally Stratified Flow," *Proceeding of the 1988 Joint ASME-ANS Nuclear Power Conference*, April 17-20, pp. 45~50.
- (9) 이근성, 1992, "수평배관 계통내 열성층현상에 관한 연구," 석사학위논문, 경희대학교
- (10) 안장선, 1993, "열성층화된 수평원관내의 자연대류에 대한 수치적 연구," 선임심사논문, 한국원자력연구소.
- (11) KEPCO, KOPEC and S&L, 1992, *Review of Thermal Stratification Potential in YGN 3 & 4/UCN 3 & 4 Feedwater System*, KOPEC Interoffice Memorandum ES/KS-92464K.
- (12) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company.