

분기배관에서의 열성층 현상 완화방안에 관한 연구

박 만 흥, 김 광 추, 이 승 철*

한전기술(주), *강원대학교 소방방재학부

A Study on the Mitigation Schemes of Thermal Stratification Phenomenon in a Branch Piping

Man-Heung Park, Kwang-Chu Kim, Seung-Chul Lee*

Korea Power Engineering Company, KyungGee 449-713, Korea

*School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok 245-711, Korea

(Received May 12, 2006; revision received June 14, 2006)

ABSTRACT: A variety of schemes were sought for a mitigation of thermal stratification phenomenon in the branch piping of domestic nuclear power plant. Several mechanisms of thermal stratification occurrence were introduced in this paper. A number of factors were selected to find out the schemes for thermal stratification mitigation and the computational analysis were performed. The length of vertical branch piping, the diameter, the radius of curvature of the elbow, the direction of connection between main piping and branch piping, the slope of branch piping, the leakage flow rate, the installation of additional valve, the change of the 1st valve position and another branch piping connected with branch piping were mentioned as factors in this paper.

Key words: Thermal stratification(열성층), Branch piping(분기배관), Mitigation schemes(완화방안)

1. 서 론

열성층(thermal stratification) 현상이란 배관 내 온도가 서로 다른 두 유체 간의 온도/밀도차로 인한 부력에 의해 고온유체와 저온유체로 층을 이루며 유동이 안정화하려는 현상을 말한다. 이와 같은 배관 내의 열성층 현상은 배관 상하단 온도차로 인해 굽힘응력이 유발되고, 배관 및 지지대에 심각한 변형을 유발할 수 있다. 또한 열성층 현상이 주기적으로 반복되면 심각한 피로손상으로 열적 피로(thermal fatigue)로 인한 균열이 야

기될 수 있다.⁽¹⁾ 현재 미국에서는 열성층 현상이 발생될 것으로 예상되는 원전의 주요 배관에 대해 해석적 평가, 설계개선 또는 비파괴검사를 이용한 배관의 건전성을 입증하도록 요구하고 있으며, 국내에서도 규제기관을 통해 원자로 냉각재 배관에 연결된 분기배관들에 대한 검사와 대책을 강화하도록 하고 있다.

본 연구에서는 국내 원전 원자로 냉각재 계통 배관과 연결된 안전 1등급 분기배관에서의 열성층 현상 완화를 위한 국내외 해결사례 및 직접적인 열유동 해석을 통해 열성층 현상을 완화할 수 있는 방안을 모색해 보고자 한다.

일반적으로 열성층 발생 주요 원인을 살펴보면, 크게 5가지의 원인으로 나누어질 수 있다.^(2,3)

- 강제대류(Forced Convection)

† Corresponding author

Tel.: +82-33-570-6815; Fax: +82-33-570-6819

E-mail address: sclcee@kangwon.co.kr

- 자연대류(Natural Convection)
- 난류침투(Turbulent Penetration)
- 누설(Leakage)
- 2상 유체(Two Phase Fluid)

2. 열유동 해석

2.1 지배방정식

열성층 현상 완화를 위한 직접적인 열유동 해석에는 지배방정식으로 비정상 보존방정식들이 사용되었으며, 난류모델로 RNG $k-\epsilon$ 모델이 사용되었다. 부력에 의한 효과를 고려하기 위해 운동량 보존방정식에 증력항을 생성항(source term)으로 추가하였다. 모든 물성치는 기술자료⁽⁴⁾에 수록된 물성치자료를 근거로 하여 응용 프로그램을 이용하여 온도의 함수로 상관식을 구하였으며, Table 1에 상관식을 나타내었다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

운동량보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho_0 - \rho)g_i \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] \end{aligned} \tag{2}$$

에너지보존방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j T) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} + \frac{k_f}{C_p} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \tag{3}$$

난류량보존방정식(RNG $k-\epsilon$ model)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} \\ + G - \rho \epsilon \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} \\ + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \\ + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta_i \eta^3} \cdot \frac{\rho \epsilon^2}{k} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, 각 방정식에 사용된 난류변수 및 실험상수들은 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

$$G = 2\mu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{7}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{8}$$

$$S = \sqrt{(2S_{ij} S_{ij})} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} C_1 = 1.42, \quad C_2 = 1.68, \quad C_\mu = 0.085 \\ \sigma_k = 0.719, \quad \sigma_\epsilon = 0.719, \quad \sigma_t = 1.00 \\ \beta_i = 0.012, \quad \eta_0 = 4.38, \quad \eta = S \frac{\epsilon}{k} \end{aligned} \tag{10}$$

2.2 수치해석

유한체적법을 사용하는 CFD 코드인 FLUENT 5.5가 사용되었다. 대류항과 압력장을 풀기 위해 5.5가 사용되었다. 대류항과 압력장을 풀기 위해서는 QUICK 도식⁽⁵⁾ 및 SIMPLE 알고리즘⁽⁶⁾을 사용하였으며, 모든 종속변수에 대하여 하향이완

Table 1 Properties

Properties		Correlation of temperature
Fluid	Density	$1524.27001 - 3.50696T + 0.00851T^2 - 8.43758 \times 10^{-6}T^3$
	Specific heat	$-240231.10786 + 2897.61195T - 13.6178T^2 + 0.03172T^3 - 3.6646 \times 10^{-5}T^4 + 1.68276 \times 10^{-8}T^5$
	Viscosity	$0.03937 - 3.80071 \times 10^{-4}T + 1.48602 \times 10^{-6}T^2 - 2.92016 \times 10^{-9}T^3 + 2.8754 \times 10^{-12}T^4 - 1.13317 \times 10^{-15}T^5$
	Conduction coefficient	$-0.26917 + 0.00465T - 5.59338 \times 10^{-6}T^2$
Solid	Specific heat	$277.2396 + 0.889T - 9.64533 \times 10^{-4}T^2 + 4.00273 \times 10^{-7}T^3$
	Conduction coefficient	$8.96829 + 0.01534T$

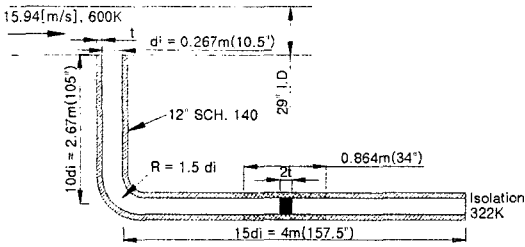


Fig. 1 Schematic of standard model for CFD analysis.

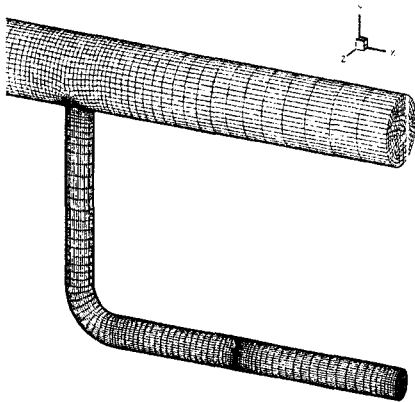


Fig. 2 Grid system.

을 사용하였다. 또한 시간간격은 0.5초로 정하였다.

2.3 경계조건

열성층 완화방안을 위한 전산해석 표준모델 및 격자망은 Fig.1 및 Fig.2와 같다. 초기 322 K의 저온수가 분기배관에 채워져 있으나, 시간이 지남에 따라 주배관을 통해 분기배관으로 고온수가 침투한다. 밸브 디스크의 두께는 배관 두께의 2 배로 가정하였다. 수평배관의 끝단은 2번째 밸브에 의하여 격리되어 있다고 가정하고 322 K의 등온벽으로 가정하였다. 배관의 재질은 ANSI316의 물성치를 사용하였다.

3. 열성층 현상 완화방안

본 연구에서는 수직배관 길이의 변화, 분기배관 직경의 변화, 엘보의 곡률반경의 변화, 분기배관 연결방향의 변화, 분기배관 기울기 변화, 밸브

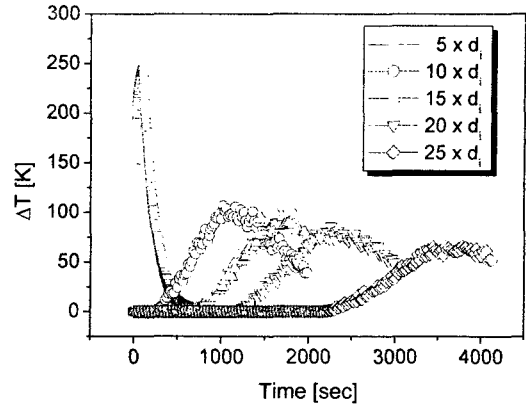


Fig. 3 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various lengths of vertical branch piping.

를 통한 누설량 제어, 밸브의 추가설치, 엘보에서 첫번째 밸브까지의 거리 축소, 또 다른 분기배관의 연결위치에 따른 열성층 완화방안을 모색하였으며 기타 관련 문헌을 통한 기존 연구의 열성층 완화방안도 소개하였다.

3.1 수직배관 길이의 변화

Fig.3은 원자로 냉각재 계통 배관에 직접적으로 연결된 수직배관의 길이를 분기배관 내경의 5 배, 10배, 15배, 20배 및 25배로 증가시킨 5가지 경우의 전산해석 결과이다. 온도측정 위치는 수직배관을 지난 수평배관 시작지점이다. 수직배관의 길이가 증가할수록 수평배관에서의 열성층 현상으로 인한 배관 내벽 상하단의 온도차는 감소하였으며, 특히 수직배관의 길이가 5배에서 10배로 증가하였을 경우는 최대 온도차의 값이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.2 분기배관 직경의 변화

Fig.4는 표준모델에 대하여 분기배관의 직경을 6, 8 및 12로 하였을 경우의 엘보를 지난 수평배관 시작점에서의 배관 내벽 상하단의 시간에 따른 온도차를 나타내고 있다. 주배관에서 온도가 높고 속도가 빠른 유체유동에서 발생된 와류에 의해 난류침투가 이루어져 분기배관에서 열성층 현상이 발생하게 된다.⁽¹⁾ 난류침투에 의해 분기배

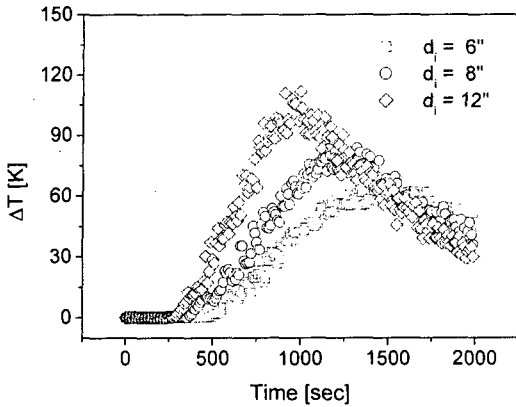


Fig. 4 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various diameters of branch piping.

관에 유입된 고온유체는 배관 내부 상단 표면을 따라 흐르게 되고, 분기배관 내의 저온유체는 배관 내부 하단 표면을 따라 흐르게 되어 분기배관 내부 상하단 표면에서 온도차가 크게 나타난다. 이러한 열성층 현상은 배관 직경이 클수록 크게 나타나며, 배관 직경이 감소할수록 상하단에 흐르는 고온 및 저온 유체의 간격이 점차 좁아져서 서로의 간섭현상으로 인한 열적인 혼합효과가 증대하여 계산결과와 같이 열성층 효과는 감소하게 된다.

3.3 엘보의 곡률반경의 변화

본 연구에서는 Fig.1의 전산해석 표준모델을 기준으로 수직배관과 수평배관을 연결하는 엘보의 곡률반경(R)에 따른 열성층 효과를 수치해석을 통해 고찰하였다. Fig.5의 전산해석 결과를 살펴보면 곡률반경이 클수록 열성층 현상에 의한 온도차는 감소하는 것으로 나타났다.

3.4 분기배관 연결방향의 변화

Fig.6은 원자로 냉각재 계통 배관에 직접적으로 연결된 수직 분기배관의 연결 방향을 동일한 형상과 유동조건에 대해 상부에 연결한 경우와 하부에 연결한 경우에 대한 열성층 해석결과이다. 분기배관의 수직배관이 원자로 냉각재 계통 배관의 상부에 연결된 경우는 난류침투와 부력의 방향이 동일함에 따라 수평배관에서의 열성층 발

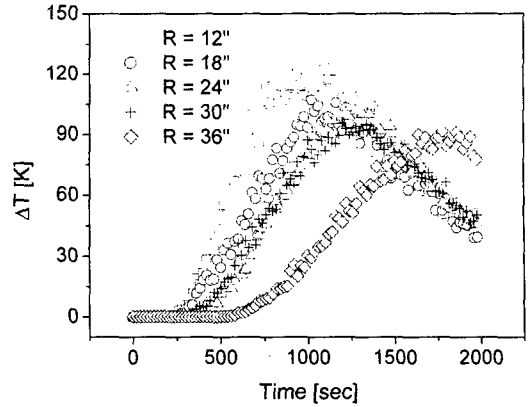


Fig. 5 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various radius of curvature of elbow.

생이 조기에 나타났으나 빠른 시간 내에 열적 혼합이 이루어진다. 반면, 하부에 연결된 경우는 난류침투로 인한 유동의 힘과 부력의 방향이 서로 반대로 작용하여 수직배관을 따라 침투하는 유동의 속도가 상부에 연결된 경우보다 상대적으로 작아 수평배관에서의 열성층 현상 발생시점이 늦게 나타나며, 또한 이러한 낮은 침투속도와 수평배관에서의 부력의 효과가 열성층 효과를 상대적으로 크고 장시간 나타내게 하였다.

열성층 현상 발생시점이 늦게 나타나며, 또한 이러한 낮은 침투속도와 수평배관에서의 부력의

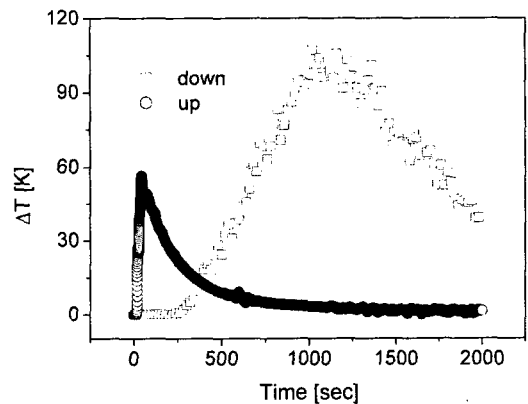


Fig. 6 Temperature difference between top and bottom of inner wall for the direction of connection between main piping and branch piping.

효과가 열성층 효과를 상대적으로 크고 장시간 나타나게 하였다.

3.5 분기배관 기울기 변화

본 연구에서는 분기배관의 기울기를 변화시켰을 경우에 따른 열성층 효과를 살펴보았다. Fig. 7은 전산해석에 사용된 분기된 수직 및 수평배관의 기울기의 변화를 나타내며, 해석결과를 Fig. 8

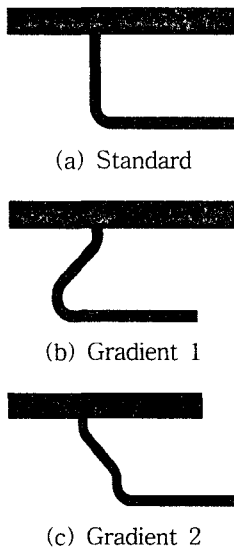


Fig. 7 Schematic of gradient changes of branch piping used in the computation.

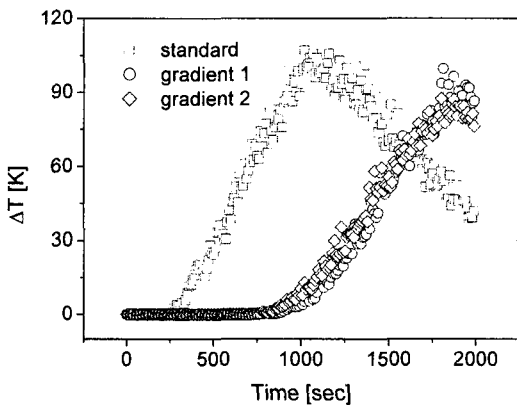


Fig. 8 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various gradients of branch piping.

에 도시하였다. 수평배관 시작지점에서의 배관 내벽 상하단의 시간에 따른 온도차의 변화를 살펴보면, 표준모델에 비하여 수직배관에 기울기를 부여한 경우가 열성층 현상의 발생시간 지연 및 최대 온도차의 감소를 나타냈다.

3.6 밸브를 통한 누설량 제어

Fig. 9는 국내 가동원전 중 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 안전주입 계통 배관에서 밸브를 통해 누설이 발생하는 경우 누설시험 절차서에 명시된 허용 누설량을 기준으로 누설량을 증가시켜가며 수행한 전산해석 모델이다.

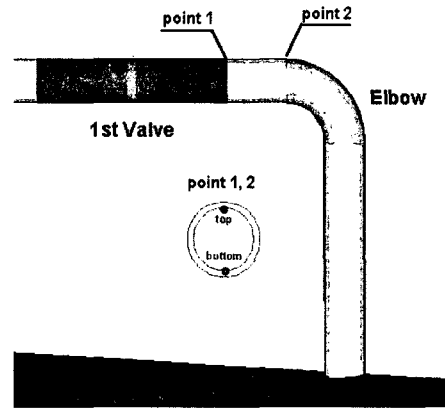


Fig. 9 Schematic of computational model for leakage.

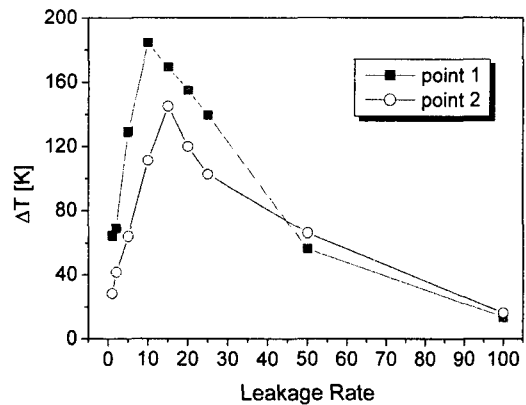


Fig. 10 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various leakage rates.

누설로 인한 배관에서의 온도차는 point 1(밸브와 수평배관의 연결지점) 및 point 2(수평배관과 엘보와의 연결지점)에서 측정되었다. Fig. 10의 전산해석결과를 살펴보면, 최대 온도차가 발생하는 임의의 누설량까지는 누설량이 증가할수록 배관 내벽 상하단의 온도차는 증가하나, 이러한 최대 온도차가 발생하는 임계 누설량을 넘어서 누설량이 증가하게 되면 혼합효과의 증대 및 Ri 수의 감소로 인해 온도차는 감소하는 것으로 나타났다.⁽⁷⁾

3.7 밸브의 추가설치

밸브 디스크에 손상이 발생할 경우 밸브 전, 후단의 압력차에 의해 누설이 발생하여 배관 내에 열성층 현상이 발생할 수 있다. Fig. 11(a)는 밸브를 통해 누설이 발생할 경우에 대한 예를 도시하고 있다. 원자로 냉각재 계통 배관과 연결된 안전관련 시스템에서 중간에 1개의 밸브만으로 차단되어 누설이 발생할 경우 두 시스템 간의 압력차로 인해 누설이 계속적으로 진행되어 열성층 현상이 발생할 수 있다. 그러나 Fig. 11(b)와 같이 중

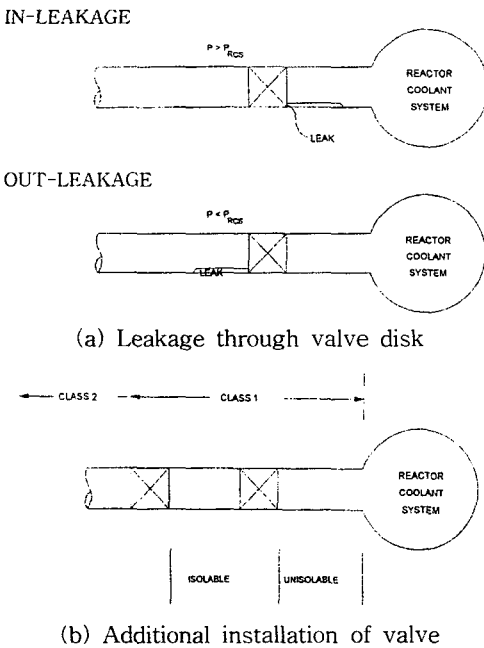


Fig. 11 The scheme of thermal stratification mitigation using the additional installation of valve.

간에 다수의 차단밸브나 체크밸브를 추가할 경우 누설로 인한 열성층 발생을 완화시킬 수 있다. 즉, 단일배관 중간에 다수의 차단밸브를 설치할 경우 모든 밸브가 동시에 손상을 입어 누설이 배관을 따라 계속적으로 진행할 가능성은 매우 희박하며, 또한 다수의 차단밸브 중에 한 개의 밸브가 손상을 입어 누설이 발생하는 경우라도 밸브 뒷단에는 또 다른 차단밸브가 설치되어 있으며, 배관 내의 냉각수는 비압축성 유체이므로 손상밸브 전후단의 압력차는 빠른 시간 내에 사라지게 되어 누설이 계속적으로 진행하지 못하게 되기 때문이다.

3.8 엘보에서 첫번째 밸브까지의 거리 축소

Fig. 12는 수평배관 시작지점에서 첫번째 밸브 디스크까지의 거리가 $l_h=2\text{m}$ 인 표준모델을 기준으로 l_h 의 거리를 3m와 4m로 증가시켜 가며 전산해석한 결과이다. 온도추정은 수평배관 시작지점에서 측정되었으며, 전산수치해석 결과 첫번째 밸브까지의 수평배관 길이의 증가가 열성층 효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 13의 동일한 계산시간 1,000초에서의 온도분포의 결과를 보면 수평배관 시작점으로부터 첫번째 밸브 디스크까지 열성층에 의한 온도구배가 나타나는 것을 볼 수 있다. 수평배관 시작점에서의 배관 상하단의 온도차는 모두 유사하다 할지라도 등온선(iso-thermal line)이 수평거리

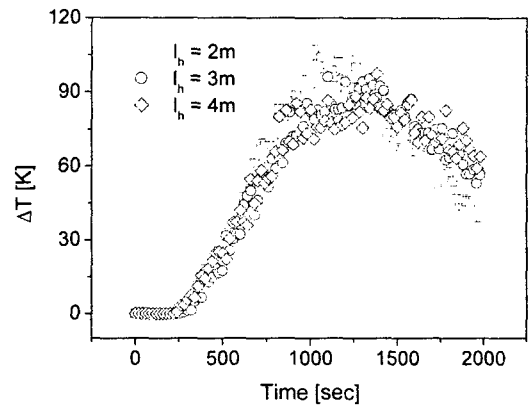


Fig. 12 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various distances between elbow and 1st valve.

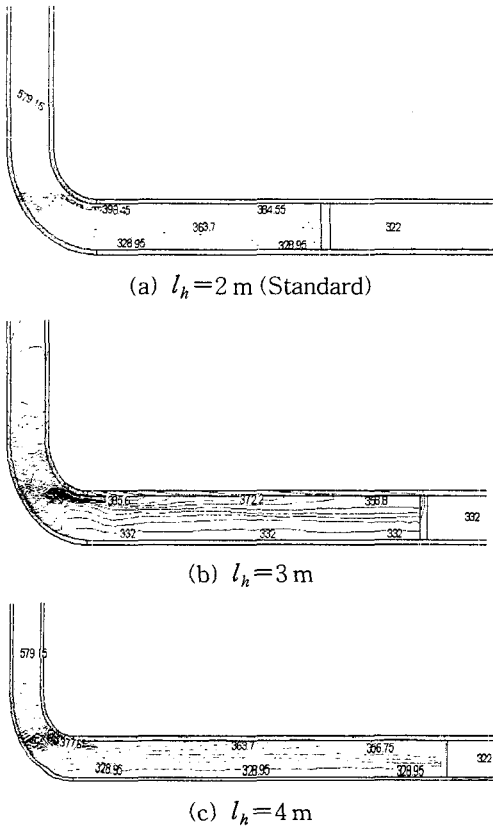


Fig. 13 Temperature contour for various distances between elbow and 1st valve.

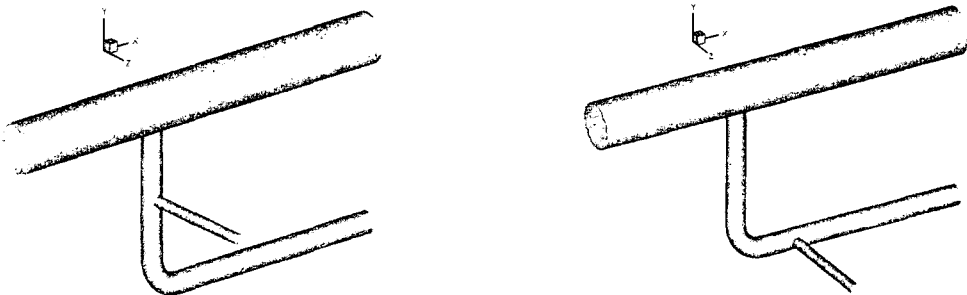
가 길어짐에 따라 길게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 배관 상하단 간의 온도차가 동일할지라도 직경에 대한 수평배관의 길이가 긴 경우가 짧은 경우보다 온도구배 등온선이 길게 나타남으로 열성층에 의한 굽힘응력 및 변형이

크게 나타날 것으로 예측될 수 있다. 따라서 등온선의 분포가 짧게 나타나도록 수평배관의 첫 번째 밸브까지의 거리를 줄이는 것이 열성층 현상에 의한 굽힘응력 및 배관손상을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3.9 또 다른 분기배관의 연결위치

Fig. 14는 분기배관에 연결된 또 다른 분기배관의 연결위치를 변경시킴에 따른 열성층 효과를 고찰하기 위한 전산해석 모델의 개략도이다. 전산해석 표준모델을 근간으로 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 분기배관 수직배관의 중간지점에 또 다른 분기배관을 연결한 경우와 수평배관의 중간지점에 또 다른 분기배관을 연결한 경우로 나누어 전산해석을 실시하였다. 온도의 측정은 분기배관과 또 다른 분기배관의 연결지점으로부터 0.5 m 떨어진 지점에서 배관 내벽 상하간의 온도차를 측정하였다. 이러한 경우에 수직배관에 연결된 경우가 수평배관에 연결된 경우보다 원자로 냉각재 계통 배관에 더 근접하게 된다.

Fig. 15는 Fig. 14의 모델에 대한 전산해석 결과이다. 원자로 냉각재 계통 배관에 근접하여 분기배관의 수직배관 중간지점에 연결된 또 다른 분기관의 경우가 원자로 냉각재 계통 배관으로부터 상대적으로 멀리 떨어진 분기배관의 수평배관 중간지점에 연결된 경우보다 열성층 현상에 의한 최대 온도차가 약 7배 정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 또 다른 분기배관에서 발생하는 열성층 현상은 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 분기배관에서의 난류침투에 의해 발생하는 것이므로 난류침투의 강도가 상대적으로 큰 수직배관에



(a) The case connected with vertical branch piping (b) The case connected with horizontal branch piping

Fig. 14 Schematic of computational model for connection position change of another branch piping.

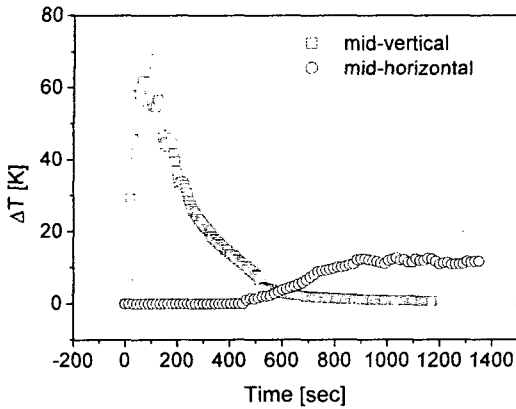


Fig. 15 Temperature difference between top and bottom of inner wall for various connection position of another branch piping.

연결된 경우가 열성층 현상에 의한 온도차가 크게 나타난다. 반면 상대적으로 난류침투의 강도가 작은 수평배관에 연결된 경우가 온도차가 작게 나타난다. 따라서 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 분기배관에서 또 다른 분기배관을 연결하는 경우에 난류침투에 의한 영향이 상대적으로 적게 작용할 수 있도록 원자로 냉각재 계통 배관으로부터 가능한 멀리 위치하여 연결하는 것이 열성층 효과를 감소시키는 측면에서 유리하다.⁽⁸⁾

3.10 기타 관련 문헌

본 연구에서 모색된 방법들 외에 기존 연구 및 관련 문헌들에 의하면 배관의 외부가열을 통해 혼합시간을 단축시켜 열성층을 완화시키는 방안,⁽⁹⁾ 이상 유체에 의한 열전달 발생시 상변화(phase change)가 발생할 수 있는 계면의 면적을 축소시키는 방향으로 배관의 형상을 변형하는 방법⁽¹⁾ 및 고온과 저온의 유체가 만남으로 인해 열성층 현상을 피할 수 없는 경우에 엘보 등의 취약부위를 피하여 열성층이 발생하도록 설계하는 방안⁽¹⁰⁾ 등을 찾아볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 원전 원자로 냉각재 계통 배관과 연결된 안전 1등급 분기배관에 대한 전산

해석을 수행하고 다음과 같은 열성층 완화방안을 모색하였다.

(1) 원자로 냉각재 계통 배관에 직접적으로 연결된 수직배관의 길이가 증가할수록 수평배관에서의 열성층 현상에 의한 온도차는 감소한다.

(2) 분기배관의 직경이 작을수록 배관 내에 열적 혼합효과가 상대적으로 커짐에 따라 열성층 현상에 의한 온도차를 감소시킬 수 있다.

(3) 분기배관에서 수직배관과 수평배관을 연결하는 엘보의 곡률반경을 크게 함으로써 열성층 현상에 의한 온도차를 줄일 수 있다.

(4) 동일한 기하학적 형상에 대해 원자로 냉각재 계통 배관에 직접적으로 연결된 분기배관의 수직배관을 상부에 연결시킨 경우보다 하부에 연결시킨 경우가 부력으로 인한 난류침투에 의한 유동의 세기가 약화되어 최대 온도차의 발생시점이 상당히 늦게 나타났으며, 장시간 열성층 현상이 유지되었다. 또한 상부에 연결시킨 경우보다 최대 온도차의 값이 크게 나타났다.

(5) 분기배관의 수직배관이나 수평배관에 기울기를 주어 열성층 효과를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 분기배관에 기울기를 부여하여 난류침투의 강도를 줄임으로써 열성층 현상에 의한 온도차를 감소시킬 수 있다.

(6) 배관 내에 밸브를 통한 누설이 발생하는 경우에 연속누설이나 누설량의 제어를 통해 열성층 현상에 의한 배관 상하단의 온도차를 줄일 수 있다.

(7) 배관 내 냉각수가 비압축성 유체라고 가정하면 밸브를 통한 누설을 방지하기 위하여 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 분기배관의 중간에 다수의 차단밸브나 체크밸브를 추가하여 누설로 인한 열성층 발생 완화 및 가능성을 줄일 수 있다.

(8) 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 분기배관의 수평배관 내에 열성층 현상이 발생하는 경우, 첫번째 밸브의 위치에 따라 수평배관 내의 동일 지점에 대한 온도차의 값은 미미하였으나, 수평배관 시작점에서 첫번째 밸브 디스크까지 온도구배가 형성됨으로써 굽힘(bending)에 의한 변형이 크게 나타날 수 있기 때문에 가능하면 수평배관에서 수평배관 시작점으로부터 밸브까지의 거리가 짧은 것이 열성층 현상에 의한 배관 손상의 가능성을 줄일 수 있다.

(9) 원자로 냉각재 계통 배관에 연결된 분기배관에서 또 다른 분기배관을 연결하는 경우에 난류침투에 의한 영향이 상대적으로 적게 작용하도록 원자로 냉각재 계통 배관으로부터 가능하면 멀리 위치하여 연결하는 것이 또 다른 분기배관에서의 열성층 효과를 감소시킬 수 있다.

참고문헌

1. EPRI, 1994, Thermal stratification, cycling and striping (TASCS), TR-103581.
2. Park, M. H. and Kim, K. C., 2004, Thermal stratification phenomenon and evaluation in piping, Piping Journal, Vol. 18, No. 6, pp. 188-191.
3. Park, M. H. and Kim, K. C., 2004, Thermal stratification phenomenon and evaluation in piping, Piping Journal, Vol. 18, No. 7, pp. 206-209.
4. JSME, 1983, Data Book: The Thermophysical Properties of Fluids, p. 208.
5. Lenonard, B. P. and Mokhtari, S., 1990, ULTRA-SHARP Nonoscillatory Convection Schemes for High-Speed Steady Multidimensional Flow. NASA TM 1-2568 (ICOMP-90-12), NASA Lewis Research Center.
6. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1st ed., McGraw-Hill, New York.
7. Kim, K. C., Park, M. H., Youm, H. K. and Kim, J. H., 2003, Thermal stratification phenomenon in a branch piping with in-leakage, Proc. of NURETH-10 Conference.
8. Kim, K. C., Park, M. H., Youm, H. K., Lee, S. K., Kim, T. R. and Yoon, J. K., 2003, An unsteady analysis on thermal stratification in the SCS piping branched off the RCS piping, ASME, Proc. of PVP 2003 Conference, pp. 41-49.
9. Jeong, I. S. and Park, M. H., 1999, Thermal stratification in a horizontal circular cylinder with external heat tracing, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 35, pp. 85-98.
10. KOPEC, 2002, Analysis of Thermo-Hydraulic for the Evaluation of Thermal Stratification in the Omega Piping of In-Service Nuclear Power Plant, KOPEC/02-TR-2AM, p. 13.