가동원전 잔열제거계통 배관에서의 열성층유동 해석

박만흥[†] • 김광추[*] • 김경훈[**]

An Analysis on Thermal Stratification in Residual Heat Removal System Piping of Nuclear Power Plant

M. H. Park, K. C. Kim, K. H. Kim

Key Words : Thermal Stratification(열성층), Residual Heat Removal System (잔열제거계통), Bypass piping(우회배관), Residual Heat Removal Exchanger(잔열제거 열교환기)

Abstract

Numerical analysis is carried out to assess the temperature distribution on the mixing tee line of Residual Heat Removal System (RHRS). In RHRS, hot and cold fluids of main and bypass piping are mixed and unmixed by the flow rate or piping layout. Thermal stratification phenomenon is a cause of major degradation on RHRS piping. According to the analysis for each operation modes, maximum temperature difference between top and bottom of piping were evaluated about 60K when the flow rate of main and bypass lines is same. Temperature difference will be decreased at the elbow on RHRS piping if the length of vertical piping is increased.

1. 서 론

원자력발전소의 시운전(startup operating) 및 고온대기운전(hot standby operating) 등과 같은 천이운전, 그리고 정상운전 중, 발전소 주요계통에 연결된 수평배관에서는 고온 및 저온유체가 서로 혼합되지 않고 층을 이루어 존재하는 열성층 현상이 종종 발생한다. 이러한 열성층 현상이 배관 내에 존재하게 되면 배관 상하단 온도차로 인해 굽힘응력이 유발 되고, 배관 및 지지대에 심각한 변형을 유발할 수 있다. 또한 열성층 현상이 주기적으로 반복되면 심각한 피로손상으로 인한 열적 피로로 인한 균열이 야기될 수 있다[(1)]. 특히 원전의 주요배관중에 가압기 밀림배관, 주급수 계통, 안전주입계통, 잔열제거계통 및 화학 및 체적제어계통 등의 배관에서 많이 발생되고 있는 것으로 보고되고 있다[(2)]. 이에 미국의 NRC (Nuclear Regulatory Commission)에서는 기존 원전뿐만 아니라 설계중인 원전에 대해서도 수평배관내의 열성층 현상의 존재 여부 검토 및 해석을 수행하여 배관의 건전성을 확인 하도록 NRC bulletin [(3,4,5)]에 고시하였다. 최근에는 원전설계 시 원자로냉각재계통의 주요배관에 대해서 열응력을 고려하여 설계를 하고 있으나, 원자로냉각재계통에 연결된 주요 계통의 분기배관에 대해서는 아직도 열응력을 고려하지 않고 설계를 하고 있는 실정이다.

1998 년 5 월 프랑스 Civaux 1호기 원전에서 전출력의 약 50%로 운전되고 있으면서 잔열제거계통(Residual Heat Removal System, RHRS) 이 작동하고 있던 중에 1 차측 압력이 떨어지고 가압기 수위가 감소하는 등의 현상이 발생하여 사고 조사를 진행한 결과, RHRS A train 의 배관에서 냉각수 30m^3/h 의 누설이 발생하는 것을 발견하였다.[(6)] 발생한 사고는 RHRS 열교환기를 통과한 저온의 냉각수가 흐르는 주배관과 열교환기를 통과하지 않은 고온의 냉각수가 흐르는 우회배관이 서로 만나는 지점에서 열성층 현상이 발생하여, 배관 엘보우의 용접부위에 열적 피로에 의한 균열이 발생하

† 한국전력기술㈜ 연구소
E-mail : pmh@kopec.co.kr
TEL : (031)289-4292 FAX : (031)289-4991
* 한국전력기술㈜ 연구소
** 경희대학교 기계산업시스템공학부

여 냉각수가 누설되는 사고이었다. 그러므로 프랑스 Civaux 1호기와 유사한 배관 구조를 갖고 있는 국내 원전에서도 이와 유사한 사고가 발생할 수 있는 가능성이 대두되었다.

본 연구에서는 국내 상업운전 중에 있는 원전을 대상으로 원자로냉각재계통과 연결된 안전 1등급 분기배관중 RHRS에서 주배관과 우회배관이 서로 다른 방향으로 만나는 복잡한 형상을 갖는 배관에 대하여 운전조건에 따른 열유동 해석을 수행하여 이에 대한 열성층 현상을 고찰하였다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

원전의 RHRS의 주요 기능은 원자로 정지 중에 원자로 노심에서 발생된 붕괴열을 지속적으로 제거하는 기능을 담당한다. 이러한 RHRS는 잔열제거 순환펌프 및 열교환기를 이용하여 원자로냉각재계통의 냉각수 온도를 저온정지 상태로 감소시키거나 저온정지 상태로 유지시키기 위하여 운전되며, 열교환기, 순환펌프, 유량제어밸브, 과압보호밸브 및 차단밸브 등으로 구성되어 있다. RHRS가 작동하게 되면 원자로냉각재계통의 고온 냉각수가 RHRS로 유입되어 열교환기를 통과하게 되어 저온 냉각수로 변하여 주배관으로 흐르고, 열교환기를 통과하지 않은 원자로냉각재계통의 고온 냉각수는 그대로 우회배관으로 흐르게 된다. 주배관 및 우회배관의 두개 배관은 서로 다른방향으로 수직하게 만나는 복잡한 형상을하고 있고, 두개 배관에 흐르는 냉각수의 유량 및 온도 조건은 발전소의 운전조건에 따라 달라지게 된다.

본 연구에서 채택한 RHRS배관에 대한 개략도는 Fig. 1과 같으며, RHRS에 연결된 주배관 및 우회배관은 모두 Sch. 160의 외경 0.324m, 내경 0.256m이며 배관두께는 0.034m이다.

2.2 지배방정식

본 연구에서 채택한 Fig.1과 같은 RHRS배관의 개략적인 기하학적 형상에 대하여 주배관 및 우회배관에 흐르는 고온 및 저온 냉각수에 의해 발생하는 열성층 현상에 대한 열유동 해석을 수행하기 위하여 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 고온 및 저온유체는 정상상태 3차원 유동이다.
- 온도차에 의한 유체의 밀도변화는 중력항에만 존재하며 그 이외에는 유체 및 배관의 모든 물성치는 일정하다.
- 유체의 압축성, 점성소산 및 복사열전달 효과

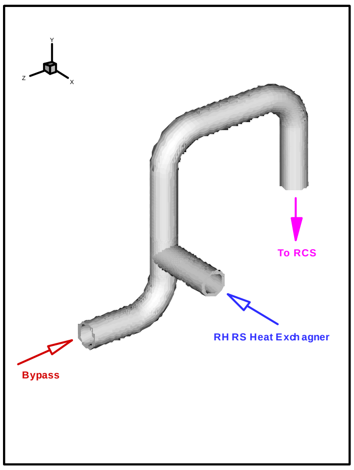


Fig. 1 Schematic view of RHRS piping.

는 무시한다.

주어진 가정에 따라 채택된 3차원 정상상태 지배방정식은 다음과 같으며, 난류모델은 표준 $k-e$ 난류모델을 채택하였다.

<u>연속 방정식</u>

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

<u>운동량보존 방정식</u>

$$\frac{\partial}{\partial t}(ru_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(ru_ju_i)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+rg_i b(T-T_{cold})+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(m+m_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}kd_{ij}\right] \tag{2}$$

<u>에너지보존 방정식</u>

$$\frac{\partial}{\partial t}(rT)+\frac{\partial}{\partial x_j}(ru_jT)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\frac{m_t}{s_t}+\frac{k_f}{C_p}\right)\frac{\partial T}{\partial x_j}\right\} \tag{3}$$

<u>난류량보존 방정식</u>(standard k-ε model)

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk)+\frac{\partial}{\partial x_j}(ru_jk)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(m+\frac{m_t}{s_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k+G_b-re \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re)+\frac{\partial}{\partial x_j}(ru_je)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(m+\frac{m_t}{s_e}\right)\frac{\partial e}{\partial x_j}\right]+\frac{e}{k}\left[C_1(P_k+G_b)-C_2re\right] \tag{5}$$

여기서, 각 방정식에 사용된 난류 변수 및 실험상수들은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$$

$$P_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_b = -\frac{\mu_t}{\sigma_t}g_i\beta\frac{\partial T}{\partial x_i}$$

$$\sigma_t = 0.85,\ \sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

2.3 경계조건

일반적으로 원전의 RHRS 는 각각 2 대의 열교환기 및 순환펌프로 이루어져 있으며, 각각 1 대의 순환펌프 및 열교환기의 정상유량은 239kg/s (=910m^3/h)이다. 그리고 RHRS 의 정상적인 총 유량은 472kg/s(=1800 m^3/h)이며, 정상운전일 경우에 주배관에 연결된 보조 유량제어밸브는 완전히 개방되어 냉각수가 흐르고 주 유량제어밸브는 열교환기의 후단 온도를 조절하기 위하여 수동으로 조절된다. 또한 우회배관의 유량조절밸브는 주 유량제어밸브가 유량을 조절함에 따라 변화하는데, 이는 RHRS 를 통과하는 총 유량인 472kg/s 을 일정하게 유지하기 위함이다. 그러므로 RHRS 의 배관에 흐르는 냉각수의 유량 및 온도 조건은 운전조건에 따라 다양하게 변화하고, 계측기에서 자동으로 조절되기 때문에 정확한 조건을 알기 어렵다. RHRS 가 정상적으로 작동하게 되면 열교환기를 통과하는 냉각수의 온도변화율은 28°C/h 로 서서히 변화하지만, 비정상/비상운전 등의 여러 운전조건 등을 고려하면 열성층 현상이 발생할 수 있고, 발전소 설계 시 안전한 설계가 이루어지도록 가장 심각한 조건을 선택하여 Table 1과 같이 경계조건을 결정하였다. RHRS 내로 흐르는 냉각수의 물성치는 고온 및 저온냉각수의 평균온도인 388K 이고 압력이 2.8 MPa 에서의 값을 취하였으며, 배관의 재질은 ANSI 304 스테인리스 강으로 가정하였다. 배관의 벽면은 단열조건이며, 초기 난류강도는 수력학적 직경을 기준으로 10%로 가정하였다.

2.4 수치해석방법

가동중인 원전의 RHRS 배관내의 열성층 유동해석을 수행하기 위해 CFD 코드인 FLUENT 5.5 를 사용하였다. 수치계산시 대류항의 차분도식으로는 상류도식(upwind scheme)을 사용하였으며, 압력장을 얻기 위하여서는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 각 변수의 수렴조건으로서 이산화방정식의 잉여값이 10^{-6} 이하에 도달하면 수렴한 것

Table 1 Boundary conditions

	Flow rate(kg/s)		Temperature(K)	
	Main	Bypass	Main	Bypass
Case 1	73	399	323	453
Case 2	239	233		
Case 3	239	108		

으로 간주하였으며, 속도장, 온도장 및 난류량의 수렴조건을 만족하기 위하여 각각 약 5000 회 이상의 반복계산이 필요하였다. 반복계산시 해의 수렴성을 개선하고 해가 발산하는 것을 방지하기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완방법을 도입하였다. 압력, 온도, 속도 및 난류량에 대해서는 선형이완방법을 사용하였으며, 이완계수로는 각각 0.1, 1.0, 0.3 및 0.3 을 사용하였다.

본 계산을 위한 RHRS 배관에 대한 격자망은 80,343 개 격자를 사용하여 수치계산을 수행하였다

3. 결과 및 고찰

3.1 RHRS 의 운전조건

Table 1에 나타낸 각 경우에 대한 RHRS 의 운전조건은 다음과 같다. Case 1인 경계조건은 주배관에 설치된 주 유량조절밸브는 닫혀있고 보조 유량조절밸브는 완전히 개방되어 주배관으로 73 kg/s(=1.48m/s)유량의 저온냉각수가 흐르고 있으며, 나머지 399kg/s(=8.08m/s) 고온냉각수 유량이 우회배관의 유량조절밸브로 흐르는 경우로 주배관 및 우회배관의 유량비가 약 1:5 인 경우이다. Case 2는 주배관의 보조 및 주 유량제어밸브가 완전히 개방되어 주배관으로 239kg/s(=4.84m/s)유량의 저온냉각수가 흐르고 있으며, 나머지 233kg/s(=4.72m/s) 고온냉각수 유량은 우회배관의 유량조절밸브로 흐르는 경우로 주배관 및 우회배관의 유량비가 약 1:1 인 경우이다. Case 3는 1 대의 순환펌프가 고장으로 1 대의 순환펌프와 2 대의 열교환기로 운전되는 비정상 운전인 경우로, 순환펌프의 과운전(run-out) 유량 이하인 347kg/s(=7.03m/s)로 운전되는 경우이다. 그러므로 주배관으로 239kg/s(=4.84m/s) 고온냉각수 유량이 흐르고, 나머지 108kg/s(=2.19m/s) 저온냉각수가 우회배관의 유량조절밸브로 흐르는 경우로 주배관 및 우회배관의 유량비가 약 2:1 인 경우이다.

3.2 열유동 특성

Fig.2 는 Case 1의 주배관 대 우회배관 유량비가 1:5 인 경우에 RHRS 배관내 streak lines 분포를 나타내고 있다. Streak lines 을 살펴보면, 주배관

및 우회배관으로 각각 유입된 온도가 서로 다른 냉각수는 서로 혼합되지 않고, 우회배관 및 주배관이 만나는 수직한 배관의 중간 부근에서 서로 만나 엘보우를 거쳐 수평배관을 지나 RHRS 를 빠져나간다. 수평배관의 중간부근 이후에 우회배관에서 유입된 고온냉각수가 주배관에서 유입된 저온냉각수가 흐르는 영역까지 내려와 약간 혼합되는 양상을 보인다. 이는 우회배관에서 유입된 냉각수가 주배관으로 유입된 냉각수 유량보다 상당히 많기 때문에 배관 후단에는 우회배관에서 유입된 냉각수 유동이 지배되기 때문이다. 또한 서로 다른 방향에서 유입된 냉각수가 각각의 관성력의 영향으로 고온냉각수는 수평배관의 뒷면을 타고 흐르며, 저온 냉각수는 앞면을 타고 흐르면서 약간의 혼합이 이루어 진다. 전체적으로 streak lines 의 분포는 RHRS 배관내에서 온도가 서로 다른 두개의 냉각수가 대부분 영역에서 서로 층 이루고 유동하는 열성층 현상이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig.3 은 Case 1 인 경우의 각 방향에서의 RHRS 배관에 대한 등온선 분포를 나타내고 있다. Fig.3(a)의 3 차원으로 나타낸 배관에서의 등온선 분포를 살펴보면, 우회배관으로 유입된 고온 냉각수 양이 주 배관으로 유입된 저온 냉각수 보다 약 5 배가 많기 때문에 주배관 및 우회배관이 만나는 수직한 배관 및 엘보우 근처에서만 저온 냉각수의 온도분포가 나타나고 대부분의 배관내에는 고온 냉각수로 채워져 유동이 이루어 지는 것을 알 수 있다. Fig.3(b)는 x 방향에서 바라본 y-z 방향 배관 앞쪽단면에서의 등온선 분포를 나타내는데, 저온 냉각수가 유입되는 주 배관 근처에서는 온도가 낮게 나타나고 엘보우 근처에서 배관 상하단의 온도차가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 수평배관에서는 고온 냉각수로 대부분 채워져 유동이 일어나며, 수평배관 후단에는 온도차가 크게 나타나지 않고 있다. Fig.3(c)는 x 방향에서 바라본 y-z 단면 뒷면에서의 등온선 분포를 나타내는 데, 고온 냉각수 유량이 많기 때문에 저온 냉각수는 거의 배관 뒷면까지 침투하지 못하고 유동이 이루어지는 것을 알 수 있다. Fig.3(d)는 z 방향에서 바라본 x-y 단면에서의 등온선 분포를 나타내고 있다. 수직배관의 중간에서 유입된 저온 냉각수는 유량이 상대적으로 고온 냉각수보다 적기 때문에 수평배관으로 유입되기 전 엘보우 근처에서 고온 냉각수에 의해 배관이 채워지며, 수직배관에서도 저온 냉각수가 유입되는 근처에서만 주로 저온의 온도분포가 나타남을 알 수 있다.

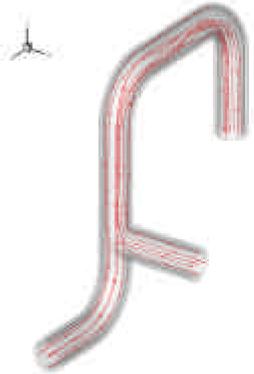
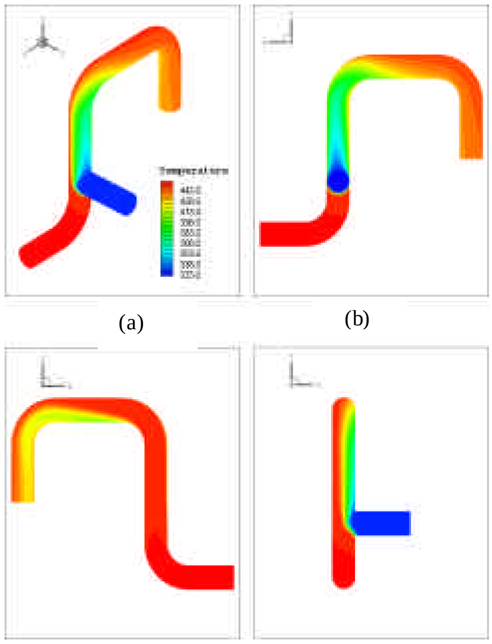


Fig. 2 Distribution of streak lines for Case1



(a) (b) (c) (d)

Fig. 3 Iso-thermal distributions for Case 1

Fig.4 는 Case 2 의 주배관 및 우회배관 유량비가 약 1:1 인 경우 RHRS 배관내의 각 방향에 따른 배관 외면에서의 등온선 분포를 나타내고 있다. Fig.4(a)의 3 차원으로 나타낸 배관에서의 등온선 분포를 살펴보면, 우회배관으로 유입된 고온 냉각수 양이 주 배관으로 유입된 저온 냉각수와 거의 같기 때문에 주배관 및 우회배관이 만나는 수직한 배관에서 각각 고온 및 저온 냉각수가 벽면을 다라 흐르고 수평배관에서는 저온 냉각수가 엘보우를 지나 수평배관에도 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig.4(b)는 x 방향에서 바라본 y-z 단면의 배관 앞면에서의 등온선 분포를 나타내는데, 저온 냉각수가 유입되는 주 배관, 수직배관, 및 엘보우 근처까지 온도가 낮게 나타나고 수평배관 후단에는 거의 고온 및 저온 냉각수가 혼합되어 유동이 일어나고 있다. Fig.4(c)는 x 방향에서 바라본 y-z 단면의 뒷면에서의 등온선 분포를 나타내는데, 수직배관에는 저온 냉각수가 거의 배관 뒷면까지 침투하지 못하고 유동이 이루어지고 있다. 수평배관에서는 상단에 고온 냉각수가 흐르고, 하단에는 저온 냉각수가 층을 이루어 유동하고 있어 열성층

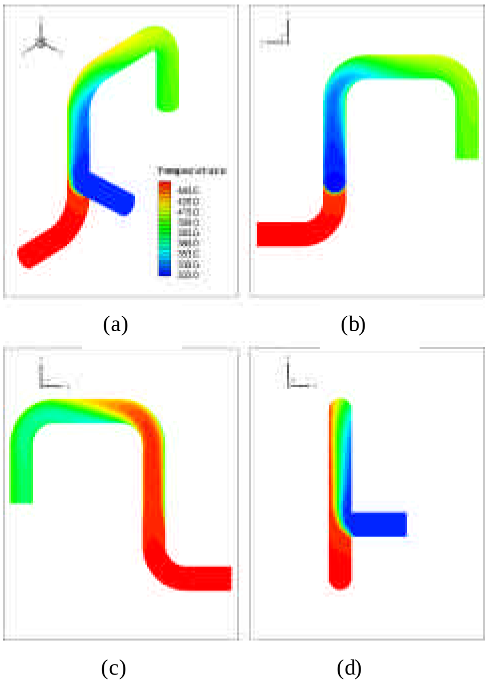


Fig. 4 Iso-thermal distributions for Case 2

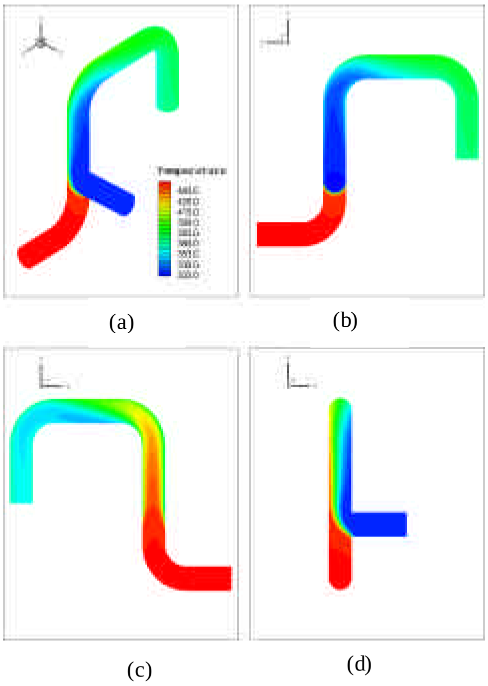


Fig. 5 Iso-thermal distributions for Case 3

나타나는 것을 알 수 있다. Fig.4(d)는 z 방향에서 바라본 x-y 단면에서의 등온선 분포를 나타내고 있다. 수직 배관의 중간에서 유입된 저온 냉각수와 고온 냉각수 유량의 비율이 거의 같기 때문에 냉각수가 고온층, 저온층 및 혼합층의 3 개 층으로 구별되어 흐르고 있음을 알 수 있다.

Fig.5 는 Case 3 인 경우의 RHRS 배관내의 각 방향에 따른 배관 외면에서의 등온선 분포를 나타내고 있다. Fig.5(a)의 3 차원으로 나타낸 배관에서의 등온선 분포를 살펴보면 우회배관으로 유입된 고온 냉각수 유량이 주 배관으로 유입된 저온 냉각수 보다 유량이 약 1/2 로 적기 때문에 우회배관의 입구 부근에서만 고온 냉각수의 온도분포가 나타나고 대부분의 배관내에는 저온 냉각수로 채워져 유동이 이루어 지는 것을 알 수 있다. Fig.5 (b)는 x 방향에서 바라본 y-z 단면의 배관 앞면에서의 등온선 분포를 나타내는데, 고온 냉각수가 유입되는 우회배관 근처에서만 온도가 높게 나타나고 대부분의 저온 냉각수의 온도분포가 나타남을 알 수 있다. 또한 수평배관에서는 저온 냉각수가 중간부근 까지 침투하며 배관 후단에도 온도구배가 거의 나타나지 않는다. Fig.5(c)는 x 방향에서 바라본 y-z 단면 뒷면에서의 등온선 분포를 나타내는데, 고온 냉각수 유량이 적기 때문에 수직배관의 일부에서만 고온 냉각수 영향이 나타나고 있으며, 수평배관에서는 고온 냉각수가 거의 침투하지 못하고 저온 냉각수로 배관이 채워져 유동이 일어나고 있을 알 수 있다. Fig.5(d)는 z 방향에서 바라 본 x-y 단면에서의 등온선 분포를 나타내고 있다. 수직 배관의 중간에서 유입된 저온 냉각수는 유량이 상대적으로 고온 냉각수보다 많기 때문에 수평배관으로 유입되기 전 엘보우 근처에서 이미 저온 냉각수에 의해 배관이 채워지며, 수직배관에서도 고온 냉각수가 유입되는 근처에서만 주로 고온의 온도분포가 나타남을 알 수 있다.

3.3 계산조건에 따른 열성층 효과

RHRS 배관에서 각 운전조건에 따른 열성층 영향을 알아보기 위하여, Fig. 6과 같이 5 개의 주요지점을 지정하여 각 지점에서의 온도분포를 각 경우에 대하여 검토하였다.

Fig.7 은 Fig.6 에 나타낸 RHRS 배관의 각 지점에 대하여 서로 마주 보는 a 점과 c 점 그리고 b 점과 d 점에서 각각의 온도차를 나타내고 있다. 먼저 Fig.7(a)의 Case1 인 경우, (a-c) 점의 온도차를 살펴보면 수직배관 부근인 p1 및 p2 지점에서는 좌우면의 온도차를 나타내기 때문에 온도차가 크지 않다. 수평배관의 p3 및 p4 지점에서는 상하단 온도차를 나타내기 때문에 배관 시작 부근인 p3 지점에서 온도차가 약 45K 로 크게 나타나고 후단으로 갈수록 온도차는 감소한다. (b-d) 점의 온도차에서 수직배관 부근은 고온 및 저온 냉각수가 직접적으로 만나는 p1 위치에서 약 120 K 의 온도차를 나타내지만 수평배관에서는 좌우면의 온도차를 나타내기 때문에 온도차가 크게 나타나지 않는다. Fig.7(b)는 Case2 인 경우로, Case 1인 경우와 유사한 형태를 나타내고 있으나 수평배관 시작 부근인 p3 지점에서 약 60K 의 비교적 큰 온도차를 나타내고 후단으로 갈수록 온도차는 감소한다. Fig.7(c)

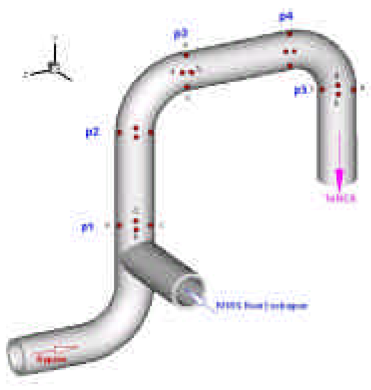
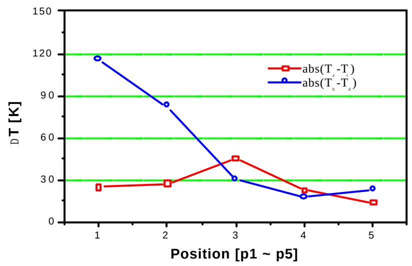
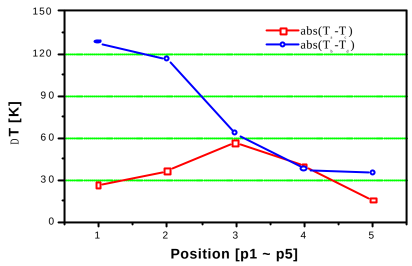


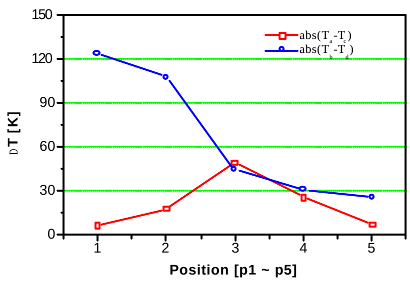
Fig. 6 Main checking point of temperature for RHRS piping



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig.7 The temperature difference of main checking point for Case1, Case2 and Case3

의 Case3 인 경우도 전자의 경우와 비슷한 경향을 보이며, 수평배관 시작 부근인 p3 지점에서 약 48K 의 온도차를 나타내었다.

위 세가지 경우에 대한 결과를 살펴보면, 현재와 같은 형상을 갖는 RHRS 배관에서 열성층 현상에 따른 열적 피로에 가장 취약한 부분인 배관의 엘보우 부근에서 상하단 온도차가 가장 크게 나고 있으며, 주배관 및 우회배관의 유량비에 크게 영향을 받는다. 그러므로 유량비의 적절한 조절은 수평배관에서의 열성층 현상을 완화할 수 있을 것이다. 또한 서로 다른 온도를 갖는 냉각수가 완전히 혼합된 후에 열적 피로에 가장 취약한 엘보우에 도달할 수 있도록 수직배관의 길이를 길게 하면 엘보우 및 수평배관에서의 열성층 영향을 피할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

가동중인 원전에서 주배관 및 우회배관이 서로 만나 복잡한 형상을 갖는 RHRS 배관에서의 운전조건에 따른 배관내의 열성층 유동에 대한 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) RHRS 배관에서 온도가 서로 다른 유체가 유입될 때, 수직배관에서는 혼합이 이루어지지 않지만 수평배관에서는 유입되는 두 유체의 관성력에 의하여 고온유체는 뒷면으로, 저온유체는 앞면으로 유동이 일어나 혼합이 일어난다. 그러므로 열성층 영향에 가장 취약한 수평배관 시작 부근인 엘보우에서 열성층 현상이 크게 일어난다.

2) 주배관 및 우호배관의 유량비가 각각 1:5, 1:1 및 2:1 인 경우에서, 유량비가 1:1 인 경우가 배관 상하단 온도차가 약 60K 로 가장 크게 나타난다.

3) RHRS 배관에서 열성층 현상은 주배관 및 우회배관의 유량비에 크게 영향을 받기 때문에, 적절한 유량비 조절은 수평배관에서의 열성층 현상을 완화할 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) EPRI, 1994, "Thermal Stratification, Cycling and Striping(TASCS)", TR-103581.

(2) "Nuclear Power Experience(NPE)", 1993, Published by RCG/Hagler, Bailly, Inc., Boulder, Co.

(3) NRC, 1979, "Cracking in Feedwater System Piping", NRC Bulletin No. 79-13.

(4) NRC, 1998, "Thermal Stresses in Piping Connected to Reactor Coolant Systems", NRC Bulletin No. 88-08.

(5) NRC, 1988, "Pressurizer Surge Line Thermal Stratification" , NRC Bulletin No. 88-11.

(6) Framatome, 1988, "RHRS Elbow Cracking at Civaux 1" , Significant Event Report No.14