

난류침투가 사각단면 T분기관 내 누설유동에 의해 발생한 열성층 현상에 미치는 영향

홍 석 우, 최 영 돈^{*†}, 박 민 수
고려대학교 대학원, ^{*}고려대학교 기계공학과

The Effect of Turbulence Penetration on the Thermal Stratification Phenomenon Caused by Leaking Flow in a T-Branch of Square Cross-Section

Seok-Woo Hong, Young-Don Choi^{*†}, Min-Soo Park

Graduate School, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received July 24, 2002; revision received February 6, 2003)

ABSTRACT: In the nuclear power plant, emergency core coolant system (ECCS) is furnished at reactor coolant system (RCS) in order to cool down high temperature water in case of emergency. However, in this coolant system, thermal stratification phenomenon can occur due to coolant leaking in the check valve. The thermal stratification produces excessive thermal stresses at the pipe wall so as to yield thermal fatigue crack (TFC) accident. In the present study, effects of turbulence penetration on the thermal stratification into T-branches with square cross-section in the modeled ECCS are analysed numerically. $k-\epsilon$ model is employed to calculate the Reynolds stresses in momentum equations. Results show that the length and strength of thermal stratification are primarily affected by the leak flow rate of coolant and the Reynolds number of the main flow in the duct. Turbulence penetration into the T-branch of ECCS shows two counteracting effects on the thermal stratification. Heat transport by turbulence penetration from the main duct to leaking flow region may enhance thermal stratification while the turbulent diffusion may weaken it.

Key words: Thermal stratification(열성층), Turbulence penetration(난류침투), T branch(T 분기관), Emergency core coolant system(비상노심냉각시스템)

기 호 설 명

A : 덕트 단면적
 F_B : 부력
 g_i : 중력가속도

k : 난류운동에너지
 T : 절대온도
 T_0 : 기준온도
 V_i : 누설유입속도
 V_m : 덕트 단면 평균속도

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3355; fax: +82-2-928-1067

E-mail address: ydchoi@korea.ac.kr

그리스 문자

ρ : 밀도

- μ : 점성계수
- μ_t : 난류점성계수
- ϵ : 난류운동에너지 소멸률

하첨자

i, j, k : 텐서 성분

1. 서 론

원자로 냉각재 계통(Reactor Coolant System, RCS) 배관에서 분기되어 있는 비상노심냉각 계통(Emergency Core Coolant System, ECCS) 배관의 수평 부위에는 체크밸브의 마모로 인한 냉각재의 누설유입으로 열성층이 발생할 수 있다.⁽¹⁾ 열성층의 지속적인 존재와 열교변(thermal cycling)⁽²⁻⁴⁾은 냉각계통 배관에 과도한 열응력을 발생시켜 배관 변형 및 열피로 균열(thermal fatigue crack, TFC)⁽⁵⁾을 가져오며 심한 경우 배관 균열로 이어져 원자로 냉각재의 유출사고를 초래할 수 있다. 따라서 배관손상의 원인이 되고 있는 열성층에 대한 이론적 연구가 필요하다. 그러나 기존의 연구⁽⁵⁻⁷⁾에서는 열성층 발생 여부와 발생위치를 예측할 만한 이론적 연구가 되어 있지 않았다.

본 연구에서는 원자로 냉각재 공급 T분기관에서서의 열성층 현상의 원인규명을 위해 실제 원형

T분기관 대신 해석이 편리한 사각단면 T분기관을 전산해석하여 열성층 생성에 관련된 변수들의 영향을 관찰하였다. 본 연구는 실제 원자로 냉각계통 배관 냉각재 누출에서 발생하는 열성층 현상의 규명을 해석하는 데 기초자료를 제공할 것이다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

본 연구에서는 T분기관 내에서 발생하는 주기적인 열교변에 의한 비정상 유동은 관찰의 대상에서 제외하고 시간 평균한 해를 구하기 위하여 다음과 같은 시간 평균 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = & \\ & - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \\ & + g_i(\rho_0 - \rho) \end{aligned} \tag{2}$$

식(2)의 우변에 있는 중력항은 온도차에 의한 부력의 효과를 고려한 것이고, 비압축성 운동량 방정식에 부력항을 삽입할 때에는 다음과 같은 Boussinesq 근사를 사용할 수 있다.

$$F_B = g_i(\rho_0 - \rho) \approx \rho g_i \beta (T - T_0) \tag{3}$$

그러나 온도차가 큰 유동에서는 Boussinesq 근사를 사용하는 것보다 중력항을 직접 계산하는 것이 더 바람직하다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 기준밀도와 기준온도를 입구온도를 기준으로 계산하여 직접 중력항을 계산하였다.

한편, 주덕트를 흐르는 유동이 갖고 있는 난류 운동에너지가 분기관으로 침입하는 현상을 난류 침투(turbulence penetration)라 하며, 이를 관찰하기 위해 난류모형으로 표준 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다. 본 연구에서는 다음의 k 방정식과 ϵ 방정식을 풀어서 난류점성계수(μ_t)를 계산하게 된다.

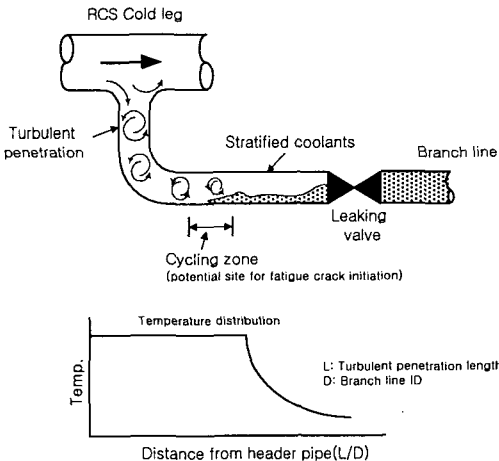


Fig. 1 Interaction of turbulent penetration and thermal stratification.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + G) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

한편, 분기관에서 열성층의 존재 여부와 발생 위치를 예측하기 위해서 다음과 같은 에너지방정식을 풀었다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} + \frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

여기서 사용한 난류점성계수와 난류전단생성항, 난류부력생성항, 그리고 난류상수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \\ G &= \frac{\mu_t}{\sigma_t} g_i \beta \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0 \\ \sigma_\epsilon &= 1.3, \quad \sigma_t = 1.0, \quad C_{e1} = 1.44, \quad C_{e2} = 1.92, \quad \beta = \frac{1}{T} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 경계조건

본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 정사각 단면의 T분기관 유동을 해석 대상으로 삼았다. 실제 원자력 발전소의 비상노심 냉각수 공급

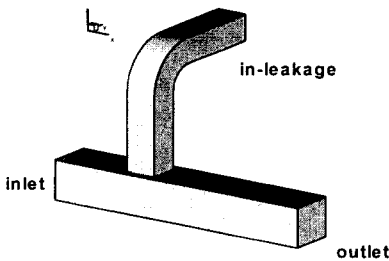


Fig. 2 Schematic diagram of main duct and T branch with square cross-sections (model of RCS and ECCS pipe system).

분기관은 원관으로 되어 있으나 원형 T분기관은 격자 생성이 어렵고 해석상 어려운 점이 많아 해석이 편이한 사각단면 T분기관으로 대체하였다. 본 연구에서 관찰하고자 하는 것은 레이놀즈수 변화에 따른 열성층 생성과 난류침투현상의 변화이며, 이 현상의 분석에 있어서 사각단면 T분기관은 원형 단면 분기관보다 더 명확한 자료분석을 가능하게 한다. 주덕트에는 입구와 출구가 있고 분기관 수평부위 단면의 하단부로 누설유입이 있다. 본 문제는 두 개의 입구와 하나의 출구가 있는 문제로 인식할 수 있다. 주덕트의 입구조건으로는 완전발달한 속도장을 주었고, 분기관의 누설유입은 정상상태라고 가정하며 단면 하단부에서 균일한 속도분포로 유입한다고 가정하였다.

출구 경계조건은 Neumann 조건을 사용하였다. 에너지방정식에 대한 경계조건으로 덕트의 벽면은 단열 조건으로 하였고 주덕트의 입구온도는 363.15 K, 누설유입온도는 293.15 K로 가정하였으며, 밀도(ρ), 점성계수(μ), 열전도계수(k), 정압비열(C_p) 등의 물성치는 입구압력에 대하여 온도에 따라 곡선맞춤(curve-fitting)한 수식을 만들어 사용하였다. 압력은 입구에서 출구까지의 변화량이 작고 물의 물성치 또한 압력에 대한 변화율이 매우 작기 때문에 온도만의 함수로 가정하였다. 입구기준압력은 대기압으로 하였다.

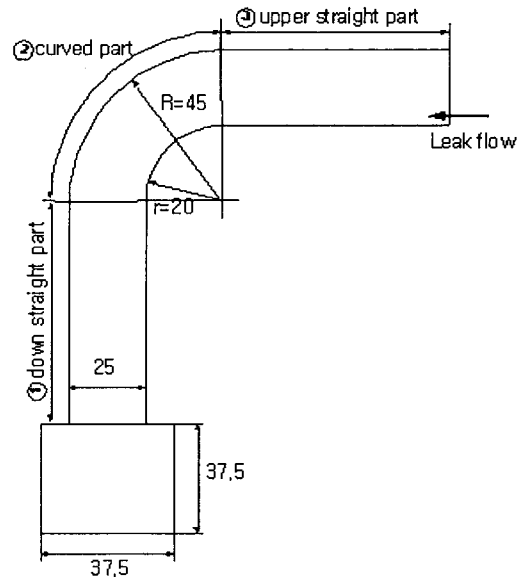


Fig. 3 Dimension of T branch and of ECCS.

Table 1 Specifications of various cases

	Inlet		In-leakage		Down	Upper
	Re	V_m [m/s]	V_i [m/s]	A [$10^{-3}m^2$]	L_1 [mm]	L_2 [mm]
Reference	57,000	0.5	0.01	0.03435	75	75
A1	34,300	0.3	0.01	0.03435	75	75
A2	114,430	1.0	0.01	0.03435	75	75
A3	228,860	2.0	0.01	0.03435	75	75

2.3 기준모형과 변수

주덕트의 수력 직경은 37.5 mm이고 분기관 수력 직경은 25 mm로 하였으며 비교대상으로 기준모형 한 가지를 설정한 후 열성층 생성에 영향을 주는 변수에 변화를 주면서 비교 관찰하였다. 기준모형은 난류침투와 열성층이 뚜렷하게 나타나는 조건을 시행착오법으로 찾아낸 것이고 분기관 상단부로 누설유입되는 저온유체의 유입유량이 과다할 경우에는 분기관 전체가 냉각되므로 열성층이 발생하지 않는다. 변수의 선택은 현재까지 보고된 자료^(4,5)들을 근거로 하여 주덕트의 레이놀즈수와 분기관의 누설유입량, 주덕트와 분기관의 수력 직경, 그리고 분기관의 길이가 난류침투와 열성층 형성에 영향을 줄 것으로 추측되어, 본 연구에서는 주덕트의 레이놀즈수가 열성층의 생성에 미치는 영향을 정성적으로 관찰하는데 초점을 맞추었다.

기준모형과 변수에 대한 상세조건은 Table 1에 나타내었다.

3. 실험결과 및 토론

열성층이 잘 생성되는 조건을 갖춘 기준모형을 비교 대상으로 하여 변수로 선택한 주덕트의 레이놀즈수와 누설유량을 변화시키면서 정성적인 특징을 관찰하였다.

기준모형에 대한 유동장의 형태는 Fig. 4와 같다. 분기관 하단부에 비교적 강한 재순환 유동이 발생하는데 이것은 주덕트를 흐르는 유동의 빠른 속도와 분기관 내 유동의 느린 속도의 차이로 인하여 발생하는 강제대류이다. 한편, 분기관 상단부에는 비교적 약한 재순환 유동이 큰 궤적을 그리는데 벽분류 형태의 누설유동이 야기시키는 재순환 유동이다. 이 두 가지의 재순환 유동의 회전축은 서로 직교한다. 이 두 직교하는 재순환

유동은 엘보의 부근에서 교차되면서 주덕트 유동이 갖는 고온의 열에너지를 분기관 상단부까지 효과적으로 전달해 주는 역할을 하게 된다. T 분기관에서 열전달의 주요 메카니즘은 직교하는 두 재순환 유동(recirculating flow)의 상호작용이다.

Fig. 5, Fig. 6에서 x축의 거리는 주덕트에서 분기관이 분기되는 지점으로부터의 거리를 나타내며 분기되는 지점이 0m, 누설 유입되는 지점이 0.2m이다. y축은 각각의 단면에 대해서 계산된 단면 최대 벽면온도차와 단면 평균 난류운동에너지를 나타낸다.

주덕트를 흐르는 유동의 레이놀즈수에 변화를 주면서 관찰한 결과 Fig. 5로부터는 레이놀즈수가 증가할수록 열성층 생성 영역이 좁아지면서 밀집되는 경향을 보이고 Fig. 6으로부터는 난류침투가 더욱 활발하게 이루어지는 것을 알 수 있다.

위의 결과들은 분기관으로의 난류침투가 분기관 내의 열적혼합(thermal mixing)을 증진시켜 열성층 길이를 축소시키는 성향을 갖게 한다는 것을 알 수 있다.

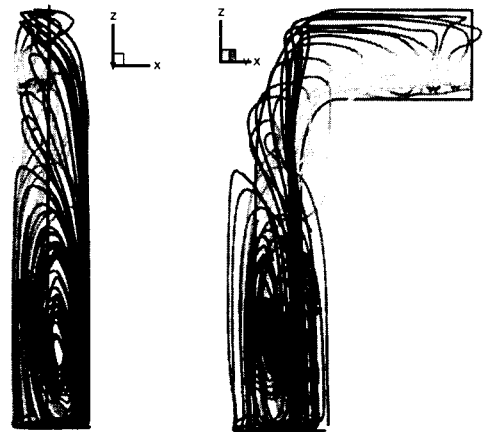


Fig. 4 Streamlines of recirculating flows in T branch for the reference condition.

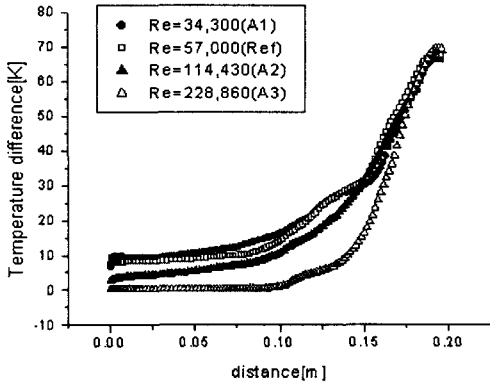


Fig. 5 Variation of maximum wall temperature difference with respect to the distance from main duct.

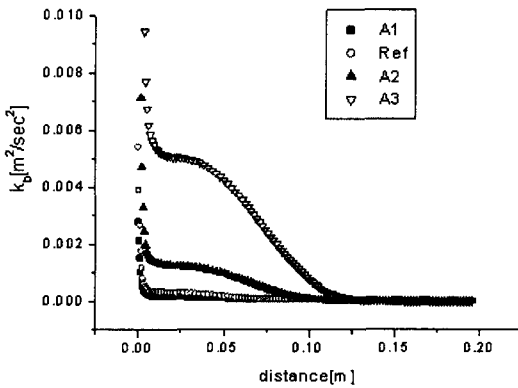


Fig. 6 Variation of bulk mean turbulent kinetic energy with respect to Reynolds number.

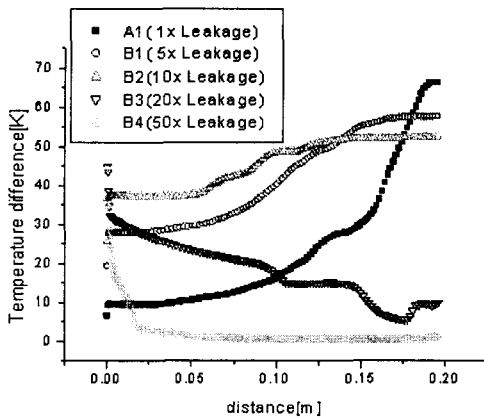


Fig. 7 Variation of maximum wall temperature difference with respect to leak flow rate.

즉, 주덕트의 레이놀즈수가 클수록 1차 재순환 유동의 강도가 커지며 2차 재순환 유동으로의 난류침투를 증가시킨다. 이 난류침투는 분기관 안쪽으로 열에너지의 운송도 크게 한다. 그러나 침투한 난류는 2차 재순환 유동 속에서 열확산을 증가시켜 열성층을 감축시키는 효과를 나타낸다. 여기서 난류관통길이(turbulence penetration length)는 난류운동에너지가 분기관 안쪽으로 침투하여 들어간 길이로 정의할 수 있는데, Fig.6으로부터 레이놀즈수의 증가로 난류관통길이가 증가함을 알 수 있고 난류관통길이의 증가는 열성층의 발생 영역을 좁아지게 하는 것을 Fig.5에서 알 수 있다. Fig.7은 누설유입량에 따른 벽면 최대온도차를 나타낸다. 누설유입량을 기존모형의 10배까지 증가시킬 때까지는 열성층 길이가 증가하고 열성층의 강도, 즉 최대벽면온도차는 감소한다. 그러나 누설유량이 그 이상이 증가하면 열성층이 소멸되고 열성층의 위치가 주덕트에서 분기관이 분기되는 부분으로 옮겨간다.

Fig.8에서 누설유입 유량을 50배로 증가시켰을 때 유선분포를 나타내는데 분기관 전체가 냉각되어 누설유동의 벽분류가 없어지고 그에 따라 열성층도 소멸되었음을 보여준다. 아울러 분기관 하단부에 발생할 것으로 보였던 재순환유동도 함께 소멸되었다. 재순환 유동의 소멸로 분기관 가열 효과가 현저히 떨어진 반면, 저온 냉각수의 누설 유입유량의 증가로 인하여 냉각효과가 증가한 결과로 볼 수 있다. 누설유입유량의 임계값을 찾아

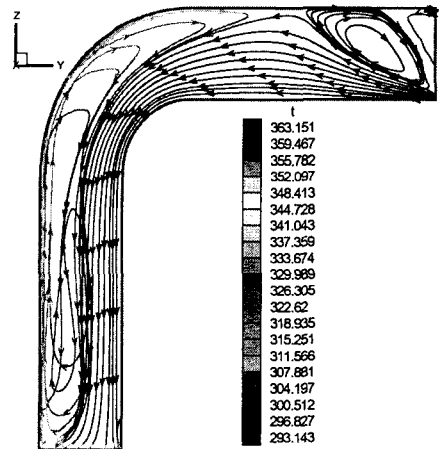


Fig. 8 Streamlines for 50 times of leak flow rate compared to reference condition.

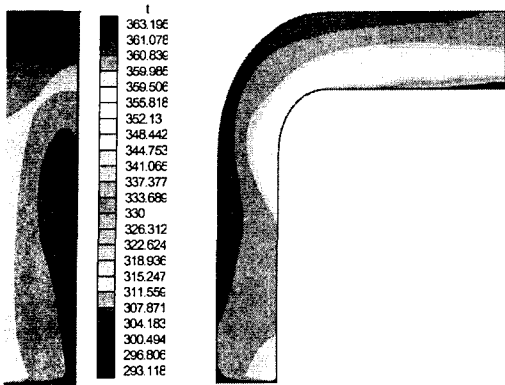


Fig. 9 Temperature distribution (K) for reference condition.

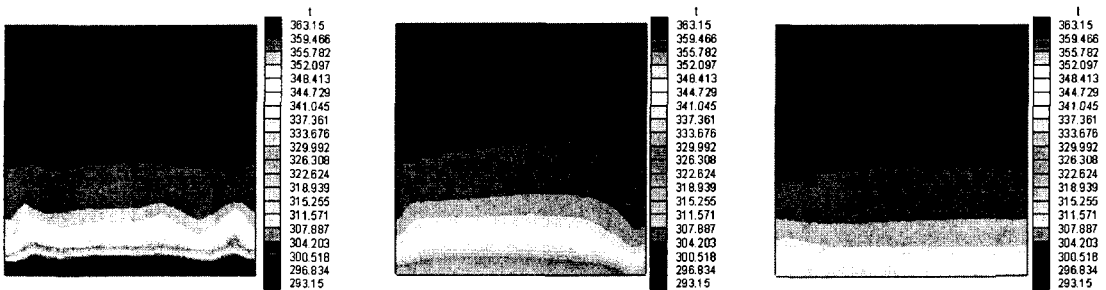
낸다면 열성층의 생성 여부를 예측하는 단서가 될 것이며 관련 무차원수에 대한 연구에 도움을 줄 것이다.

Fig. 9는 분기관을 대칭면으로 잘라서 열성층 생성 영역인 분기관 상단부 수평 부위의 단면을 잘라서 온 온도장을 나타낸다. 이 그림에는 분기관 수평부 하단에 열성층 생성이 뚜렷이 나타나 있다. Fig. 10(a)는 누설 부위 바로 앞 단면이며 열성층이 뚜렷하고 여러 개의 작은 와(vortex)가 단면 아래쪽에서 발생하였는데 와가 발생한 이유

는 밀도차가 큰 누설 유동이 벽분류(wall jet) 형태로 흐름에 따라 분류 경계면에서의 큰 전단에 의한 유동불안정(flow instability) 때문으로 생각된다. Fig. 10(b)는 누설 부위로부터 37.5 mm 떨어진 곳에 위치한 단면이며 상단부의 중앙에 해당한다. 열성층은 Fig. 10(a)에 비하여 상대적으로 약해졌지만 와는 오히려 더 뚜렷하게 발달하였는데 2차 재순환 유동이 야기시킨 압력장 변화에 기인된 것으로 보인다. Fig. 10(c)은 누설 부위로부터 75 mm 떨어진 곳, 즉 분기관 곡관부와 상단부의 수평 부위가 만나는 지점이다. 이 지점에서의 열성층은 Fig. 10(b)에서보다 더욱 약화되었고 와는 전체적으로 일정한 방향을 이루는 큰 와로 변화였다. 이것은 주덕트의 대류운동에 의해 발생한 1차 재순환유동(Fig. 4의 좌측 그림)의 영향이 엘보우 부근에 미쳐 나타난 것이다. Fig. 9, Fig. 10으로부터 열성층은 누설 부위 바로 앞에서 가장 뚜렷하고 거리가 멀어짐으로 인하여 차츰 약해져서 결국 분기관 하단부의 수직 부위에 이르러서는 거의 소멸된다.

4. 결 론

본 연구에서는 열성층에 영향을 미치는 변수



(a) Just before in-leakage (b) 37.5 mm away from in-leakage (c) 70.0 mm away from in-leakage

Fig. 10 Temperature distribution and secondary flow vector at the cross-section.

로 주덕트의 레이놀즈수와 누설유량을 변화시키며 열성층 발생을 수치적으로 관찰하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 주덕트의 강제대류에 의해 발생한 재순환 유동과 누설유동에 의해 발생한 재순환 유동이 엘보우 부근에서 교차되면서 주덕트의 난류와 열에너지를 분기관 상당부까지 전달하여 열성층을 생성시킨다.

(2) 주덕트의 레이놀즈수가 증가하면 난류관통 길이가 증가하게 되고 열혼합이 증진되어 분기관 상당부에 위치한 열성층의 발생 영역을 좁혀 주게 된다.

(3) 누설유입량의 변함에 따라 열성층의 길이와 벽면 최고온도차가 변하여 열성층을 가장 크게 하는 누설유입량이 존재한다. 누설유량이 그 이상 증가하면 열성층이 감소한다.

(4) 누설유동은 벽분류 형태로 강한 전단유동장을 형성하고 이는 유동 불안정성을 일으켜 분기관 단면에 2차 재순환 유동을 발생시킨다.

후 기

이 연구는 2000년 기초전력공학공동연구소의 전력기술기초연구지원사업관리번호(00-011호)의 '원전 비상노심 냉각 계통 배관 열성층화 현상 규명을 위한 전산해석 및 실험 연구'의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

1. EPRI, 1994, Thermal Stratification, Cycling and Striping (TASCS), TR-103581.
2. NRC Bulletin 88-08, 1998, Thermal Stress in Piping Connected to Reactor Coolant System.
3. NRC Bulletin 88-11, 1998, Pressurizer surge line Thermal Stratification.
4. NRC, Information Notice No. 91-19, 1991, Steam Generator Feedwater Distribution Piping Damage.
5. Han, K. S., Kim, S. T., Park, K. S., Jang, K. S. and Choi, S. N., 1998, Safety analysis on fatigue cracking of pressurizer nozzle in nuclear power plant, Proc. of the Korea Society of Mechanical Engineers, pp. 1125-1133.
6. Park, M. H., Kim, K. C., Noh, H. K. and Kim, K. H., 2000, Numerical study on the thermal mixing flow of cold leg during high pressure safety injection after loss of coolant accident, Proc. of the First National Congress on Fluids Engineering, September 1-2, Muju, Korea, pp. 475-478.
7. Park, Joon Hyuk and Chung, Il Seok, Assessment of internal leakage and temperature watching of pressure warning valve, 1999, Proc. of 99 Fall Conference, Korea Society of Nuclear Power.