

# 사각 T분기관내 누설유동의 난류침투에 의한 열성층 발생에 관한 수치해석적 연구

홍석우\* 최영돈\*\* 박민수\*\*\* 서정희\*\*\*\*

## Numerical Analysis of Thermal Stratification due to Turbulence Penetration into Leaking Flow in a T Branch

Seok-Woo Hong, Young-Don Choi, Min-Su Park and Jung-Hee Seo

Key Words: Turbulence penetration, Thermal stratification, T Branch

### Abstract

Thermal stratification due to turbulence penetration and in-leakage of valve cause the large thermal stress, which lead to fatigue crack of the piping system of nuclear power plant. So it is needed that numerical and experimental study for the phenomenon is conducted because there have not yet been sufficient study for the relationship between turbulence penetration and thermal stratification. Therefore numerical analysis is done here and respected to give a fundamental method of the approach to the phenomenon.

#### 기호설명

- $k$  : 난류운동에너지
- $\epsilon$  : 난류소멸율
- $T$  : 절대온도[Kelvin]
- $g_i$  : 중력가속도
- $\rho_0$  : 기준밀도
- $T_0$  : 기준온도
- $\beta$  : 체적열팽창계수

#### 1. 서론

원자로 냉각재 계통(RCS)의 열성층화는 냉각재 통 배관에 과도한 열응력을 발생하여 배관 변형 및 열피로 균열을 가져오며 심한 경우 배관균열로 인해 원자로 냉각재가 격납용기로 누출되어 발전소가 불시 정지되는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 배관 손상에 유체유동이 미치는 영향에 대한 연구를 수행하여야 할 필요가 있으며 주된 원인으로 추정되는 난류침투에 의한 열성층의 발생 경로와 상관관계를 밝혀내어 보다 근본적인 예방 대책을 마련할 수 있을 것이다. 여기서는 배관손상의 원인이 되는 난류침투에 의한 열성층화 현상에 초점을 맞추고 배관의 형상을 원형관에서 사각덕트로 바꾸어 전산해석을 수행하였다.

\*고려대학교 대학원 기계공학과

\*\*고려대학교 기계공학과 교수

\*\*\*고려대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*\*고려대학교 대학원 기계공학과

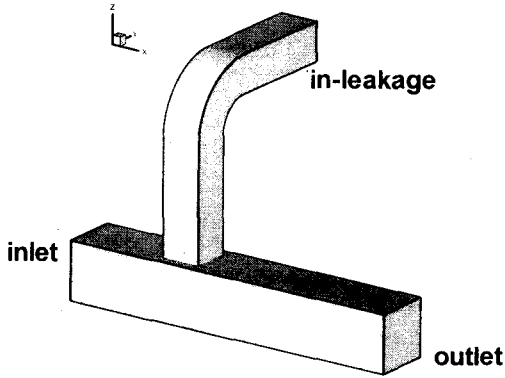


Fig. 1.1 Schematic diagram of T branch

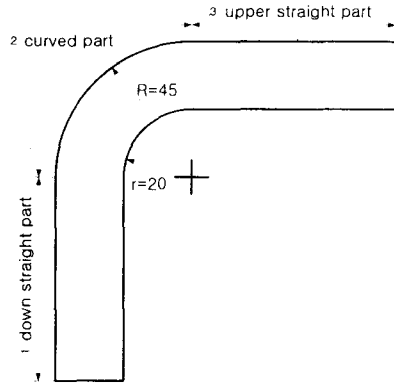


Fig. 1.2 Dimension of branch

본 연구에서 목표로 하는 것은 난류침투와 열성층화 현상에 대한 메카니즘을 규명하는 것이며, 이것은 실제 원자로 냉각계통 배관을 해석하는데 기초자료를 제공할 것이다.

## 2. 지배방정식과 경계조건

### 2.1 지배방정식

다음의 시간평균 유동방정식을 사용한다.

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

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

식 (2)의 우변에 있는 중력항은 온도차에 의한 부력의 효과를 고려한 것이다. 일반적으로 비압축성 운동량 방정식에 부력항을 고려할 때에는 다음과 같은 Boussinesq 근사를 사용한다.

$$F_b = g_i(\rho_0 - \rho) \approx \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2-1)$$

그러나 압축성 유동에서 보다 정확한 해를 구하기 위해서는 Boussinesq 근사를 사용하지 않고 본래적인 중력항을 직접 사용하는 것이 바람직하다. 기준밀도와 기준온도는 대개 입구온도를 기준으로 하여 사용한다. 난류모형은 표준  $k-\epsilon$  모형을 사용하였다.

난류모형을 대입한  $k-\epsilon$  방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + G - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + G) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

열유속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} + \frac{\mu}{Pr} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad \sigma_t = 1.0$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad G = \frac{\mu_t}{\sigma_t} g_i \beta \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

### 2.2 경계조건

Fig. 1.1 에서 보는 바와 같이 주배관의 입구와 출구가 있고 분기관에서는 누설유입으로 인한 in-leakage가 있다. 이것은 두 개의 입구와 하나의 출구가 있는 배관계로 해석이 가능하다. 입구 조건으로는 주배관 단면과 같은 단면을 갖는 직관을 완전 발달시킨 후 입구조건으로 넣어주었고 출구에서는 입구에서 들어오는 유량과 누설유입으로 인하여 들어오는 유량을 합한 유량이 출구를 통하여 나간다고 하였다. in-leakage는 정상상태라고 가정하고 단면 하단부에서 일정한 속도를 가지고 들어오는 것으로 하였다. 배관 벽면은 단열조건을 주었다.

## 3. 기준모델과 특성변수의 선정

주배관의 수력직경은  $Dh=37.5[mm]$ 이고 분기관의 수력직경은  $Dh2=25[mm]$ 로 하였으며 기준

모델을 한가지 설정한 후 특성변수에 변화를 주면서 시뮬레이션하였다. 기준모델은 난류침투와 열성층이 뚜렷하게 나타나는 조건을 예비 시뮬레이션을 통하여 찾아낸 것이다. 특성변수의 선택은 현재까지 보고된 자료들을 통하여 유추한 것이며, 주배관의 레이놀즈수와 누설유입량, 주배관과 분기관의 수직직경, 그리고 분기관의 길이가 난류침투와 열성층 형성에 영향을 줄 것으로 판단하였다.

	inlet		in-leakage		①down	③upper
	Re	속도 [ m/s ]	속도 [ m/s ]	면적 [ E-3 m <sup>2</sup> ]	L1 [ mm ]	L2 [ mm ]
기준 모델	57000	0.5	0.01	0.03435	75	75
A1	34300	0.3	0.01	0.03435	75	75
A2	114430	1.0	0.01	0.03435	75	75
A3	228860	2.0	0.01	0.03435	75	75
B1	34300	0.3	0.05	0.03435	75	75
B2	34300	0.3	0.1	0.03435	75	75
B3	34300	0.3	0.2	0.03435	75	75
B4	34300	0.3	0.1	0.17175	75	75
C1	57000	0.5	0.01	0.03435	150	150
C2	57000	0.5	0.01	0.03435	225	225
C3	57000	0.5	0.01	0.03435	300	300

Table 1. Detailed conditions of each case

Inlet 온도는 363.15[K], In-leakage 온도는 293.15[K]로 하였으며, 밀도( $\rho$ ) [kg/m<sup>3</sup>], 점성계수( $\mu$ ) [pa·sec], 열전도계수( $k$ ) [W/m·K], 정적비열( $C_p$ ) [J/kg·K] 등의 물성치는 입구압력에 대하여 온도에 따라 곡선맞춤한 수식을 만들어 사용하였다. 압력은 입구에서 출구까지의 변화량이 작고 물의 물성치 또한 압력에 대한 변화율이 매우 작으므로 입구압력에 대해서 온도만의 함수로 표현한 것은 타당성이 있다. 입구압력은 1기압으로 하였다.

기준모델과 특성변수에 대한 상세조건은 Table 1.에 나타내었다.

#### 4. 수치해석결과

##### 4.1 결과 및 해석

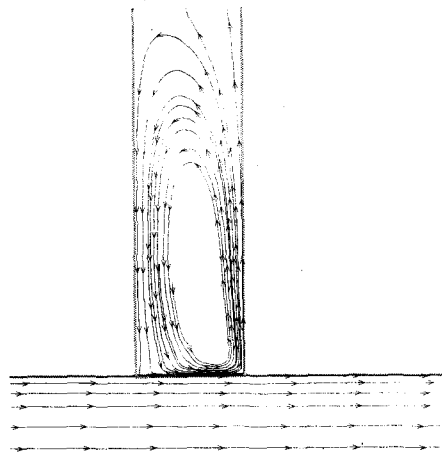


Fig. 2.1 Streamline of joint

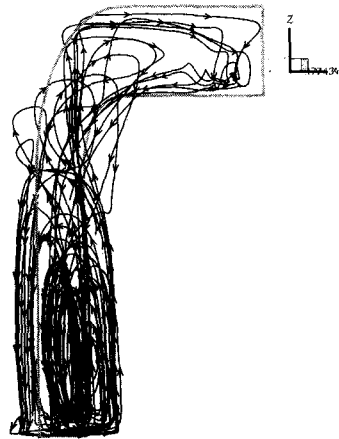


Fig. 2.2 Streamline of branch

Fig. 2.1, Fig. 2.2로부터 분기관 하단부에서는 강제대류에 의한 재순환 유동이 발생하는데 이것은 주배관을 흐르는 유동의 빠른속도와 분기관내 유동의 느린 속도차로 인하여 발생하게 된다. 한편, 분기관 상단부에는 2차 재순환유동이 큰 역할을 그리는데, 상하면의 온도차로 인한 부력에 의해서 발생하는 것으로 보인다. 이 두가지의 재순환유동이 주배관을 흐르는 유동이 갖고 있는 고온의 열에너지를 분기관 상단부까지 전달해주는 역할을 하게된다. 열에너지는 대류와 전도에

의하여 전달이 되는데 대류에 의한 열전달이 전도에 의한 열전달보다 훨씬 더 효율적이며 전도에 의해서는 주배관의 고온의 열에너지가 분기관의 상단부까지 전달될 수 없다. 만약 강제대류에 의한 재순환유동이 발생하지 않는다면 난류침투가 제대로 이루어지지 않을 것이다. 즉, 강제대류에 의한 난류침투가 바로 주배관의 열에너지를 분기관 안으로 수송하는 역할을 하게 된다.

먼저 주배관을 흐르는 유동의 레이놀즈수를 증가시키면서 시뮬레이션하였다. Fig. 3.1 에서 열성층 생성영역이 좁아지면서 밀집되는 경향을 보이며, Fig. 3.2로부터 난류침투가 더욱 활발하게 이루어지는 것을 알 수 있다. 이것은 난류침투의 경로가 되는 재순환유동의 강도가 주배관의 레이놀즈수와 비례함으로써 나타난 결과다.

다음으로, 누설유입량을 증가시키면서 시뮬레이션하였다. 누설유입량과 난류침투의 강도는 반비례함을 보이며 난류침투가 줄어들면서 열성층도 동시에 감소하는 현상을 보인다. 이것은 누설량에 따라서는 열성층이 없어질 가능성을 나타내며 누설유입량을 20배로 한 결과 분기관 하단부에 위치한 재순환유동이 소멸되었다. 난류침투의 주된 경로는 재순환유동의 오른쪽이었는데 재순환유동 자체가 소멸된 것은 난류성분이 침투할 수 있는 경로를 잃어버린 것이다. 따라서 주배관을 흐르는 유동이 갖고 있는 고온의 열에너지가 난류성분을 타고 분기관 안쪽으로 운반되어지지 못하면서 열성층이 소멸되었다. Fig. 4.1 에서 분기관 하단부(down straight part)에서 재순환유동이 보이지 않고, Fig. 4.2 에서 분기관 상단부(upper straight part)에 있었던 열성층이 소멸되었다. Fig. 4.3 에서는 난류침투가 거의 이루어지지 않음이 보인다. Fig. 4.1로부터 누설유입량과 열성층 생성의 상관관계를 알 수 있으며 누설유입량을 20배로 하였을 때 곡선의 기울기가 반대로 바뀌면서 분기관 상단부에 있던 열성층이 대부분 소멸되었고, 50배로 하였을 때는 열성층이 완전 소멸되었다. Fig. 4.3 에서 누설유입량을 20배로 하였을 때부터 난류침투가 급격히 감소하였다.

마지막으로 분기관의 길이가 어떤 영향을 주는지에 대하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 5.1, Fig. 5.2 로부터 분기관의 길이는 난류침투와 열성층

에 미치는 영향이 크지 않고 다만 분기관의 길이가 길어지게 되면 열성층의 밀집정도가 작아지게 되지만 본질적으로 열성층의 존재여부에는 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 는 특성변수 세 가지가 난류침투와 열성층 생성에 미치는 영향을 나타낸 것이며 그 밖의 다른 그림들은 기준모델과 크게 다르지 않으므로 생략하였다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 의 그림에서 x축은 주배관으로부터 분기관 단면까지의 거리를 나타낸 것이며 y축은 단면 최대 온도차와 단면 평균 난류운동에너지를 나타낸 것이다.

Fig. 6.1, Fig. 6.2 에서는 RCS COLDLEG SI 배관을 모델로 하여 실제 원자력 발전소의 배관과 비슷한 조건을 구현함으로써 기준모델의 적용가능성을 검증하였다.

#### 4.2 주배관 레이놀즈수를 특성변수로 하였을 때

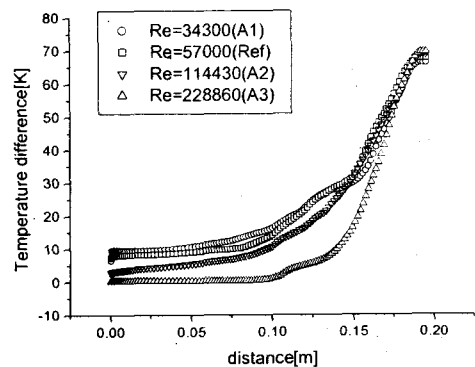


Fig. 3.1 Maximum temperature difference.

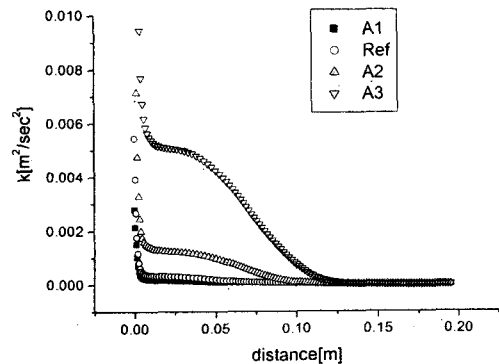


Fig. 3.2 Turbulence kinetic energy

4.3 누설유입량을 특성변수로 하였을 때

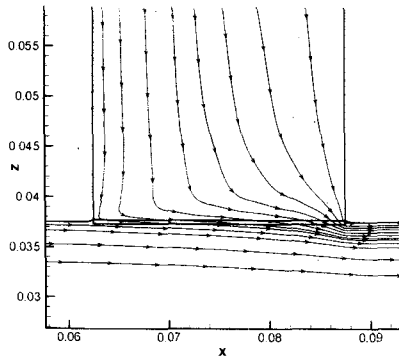


Fig. 4.1 Streamline of B3 case

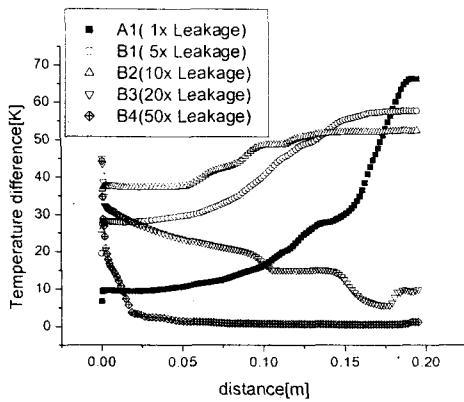


Fig. 4.2 Maximum temperature difference

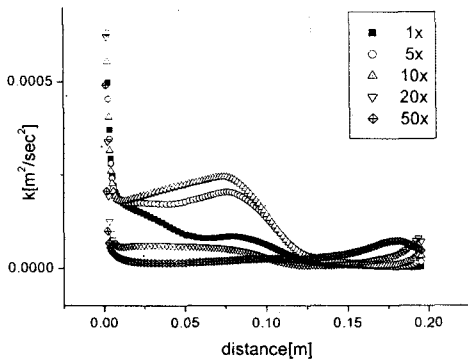


Fig. 4.3 Turbulence kinetic energy

4.4 분기관 길이를 특성변수로 하였을 때

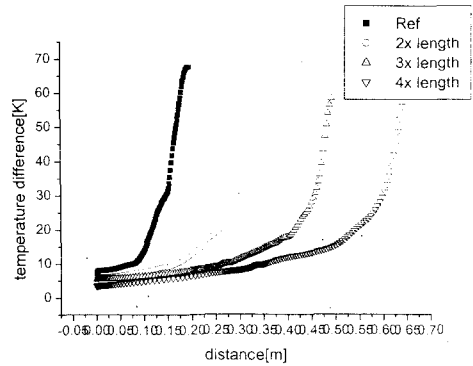


Fig. 5.1 Maximum temperature difference

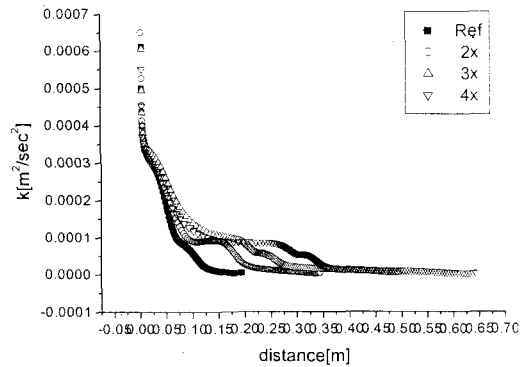


Fig. 5.2 Turbulence kinetic energy

4.5 영광 RCS COLDLEG SI 배관을 모델로 하였을 때

기준모델과 특성변수에 대한 시뮬레이션 결과를 실제 원전 비상노심 냉각계통 배관에서 발생하는 현상과 비교할 수 있는지에 대한 가능성을 검증하기 위하여 영광 RCS COLDLEG SI 배관 LOOP3를 모델로 하여 원관의 실제 크기를 수력 직경으로 환산하여 사각덕트로 바꾸고 입구압력과 온도는 기준모델과 비교하기 위하여 1기압, 363[K]로 하였다. 주배관을 흐르는 유동의 레이놀즈수는 11080660 으로 하여 실제 상황과 비슷한 조건을 구현하였다. 상세조건은 다음과 같다.

주덕트 수력직경: 29 [inch] = 0.725[m]

분기관 수력직경: 5.189 [inch] = 0.129725[m]

$r=9-5.189/2$  [inch] = 0.16[m]  
 $R=9+5.189/2$  [inch] = 0.2899 [m]  
 $L1=36$ [inch] = 0.9 [m]  
 $L2=9$ [inch] = 0.225 [m]  
 레이놀즈수: 11080660  
 주배관 유량: 2530.54 [kg/sec]  
 in-leakage 유량:  $8.917E-3$  [kg/sec]  
 주배관 유속: 5[m/sec]  
 분기관 유속: 0.01[m/sec]  
 누설면적 :0.0008923[m<sup>2</sup>]  
 입구온도: 363.15 [K]  
 입구압력: 1[bar]  
 누설온도: 293.15 [K]

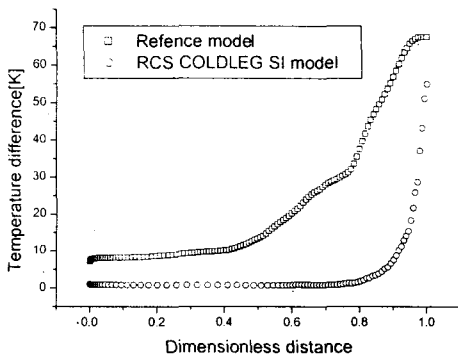


Fig. 6.1 Maximum temperature difference

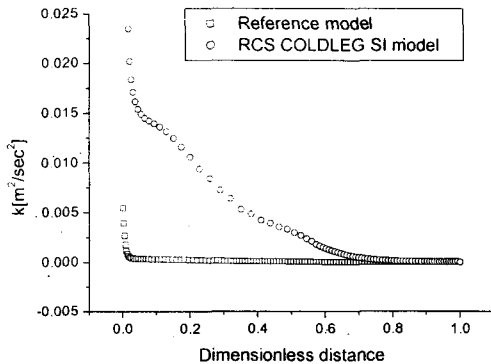


Fig. 6.2 Turbulence kinetic energy

#### 4. 결론

본 연구에서는 난류침투의 경로와 메커니즘을

규명하였으며 난류침투에 의해서 열성층이 발생한다는 가설을 뒷받침해주는 전산해석 결과를 얻었다. 따라서 실제 원자력 발전소의 배관 시스템 내부에 발생하는 균열을 예방할 수 있는 대책을 강구하는데 토대가 될 기초자료를 제공하였다.

보다 정확한 예측을 하기 위해서는 사각덕트 대신 원형관을 해석하여야 하며 재료역학적인 해석이 뒤따라야한다. 아울러 2nd Moment Closure를 도입하여야 보다 자세한 해석이 가능할 것이다. 이것은 향후 연구계획으로 남겨놓았다.

#### 후기

이 연구는 기초전력 공학 공동 연구소의 전력기술 기초연구 지원사업의 원전 비상노심 냉각계통 배관 열성층화 현상 규명을 위한 전산해석 및 실험 연구의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- [1]박만홍, 김광추, 노홍구, 김경훈, 냉각재 상실사고후 고압안전 주입시 저온관에서의 열적 혼합유동에 관한 수치적 연구, Proceedings of The First National Congress on Fluids Engineering September1-2, 2000, Muju, Korea
- [2]박준현, 정일석, 1999 압력경계밸브 내부누설 평가 및 온도 감시, 한국원자력학회, 99추계학술발표회 논문집
- [5]한균석, 김승태, 박기성, 장기상, 최성남, 원자력발전소 가압기 노즐의 피로균열 안전성 분석, 대한기계학회논문집A권 제22권 제6호, pp. 1123-1133, 1998
- [6]NRC Bulletin 88-08, Thermal stress in piping connected to reactorcoolant system, 1998
- [7]NRC Bulletin 88-11, Pressurizer surge line Thermal Stratification, 1998
- [8]이선기, 이현, 김태홍, 김범년, 1998 고리4호기 가압기 밀림배관 열성층 영향평가, 한국원자력학회, 98 추계학술발표회 논문집