

혼합배관 내의 열 경계층 이동으로 인한 고주기 온도요동에 관한 연구

김석범* · 박종호**

A Study on High Cycle Temperature Fluctuation Caused by Thermal Striping in a Mixing Tee Pipe

Seoug B. Kim*, Jong H. Park**

Key Words : Thermal striping(열 경계층이동), Turbulence(난류), Large eddy simulation(큰 에디 모사), Liquid-metal-cooled fast breeder reactor(액체금속고속증식로), Fluctuation temperature(요동온도)

ABSTRACT

Fluid temperature fluctuations in a mixing tee pipe were numerically analyzed by LES model in order to clarify internal turbulent flows and to develop an evaluation method for high-cycle thermal fatigue. Hot and cold water with an temperature difference 40 °C were supplied to the mixing tee. Fluid temperature fluctuations in a mixing tee pipe is analysed by using the computational fluid dynamics code, FLUENT. Temperature fluctuations of the fluid and pipe wall measured as the velocity ratio of the flow in the branch pipe to that in the main pipe was varied from 0.05 to 5.0. The power spectrum method was used to evaluate the heat transfer coefficient. The fluid temperature characteristics were dependent on the velocity ratio, rather than the absolute value of the flow velocity. Large fluid temperature fluctuations were occurred near the mixing tee, and the fluctuation temperature frequency was random. The ratios of the measured heat transfer coefficient to that evaluated by Dittus-Boelter's empirical equation were independent of the velocity ratio, The multiplier ratios were about from 4 to 6.

1. 서론

열 경계층이동은 열 피로를 야기 시킴으로서 배관을 파손시키는 물리적 현상중의 하나이다. 고온과 저온의 온도변화가 현저하게 발생하는 혼합배관 내부 영역의 유체유동현상을 정확히 분석하는 것은 배관설계를 위

해서 뿐만 아니라 그 건전성 확보를 위해서 필수적으로 요구된다. 최근에 열전달에 의한 여러 가지 연계효과 중에서 유동장의 온도변화로 인하여 구조물에 미치는 열전달의 크기가 열 피로에 직접적인 영향을 주는 열 경계층이동현상이 주원인이 되는 것으로 알려져 주목 받고 있다.

열 경계층이동현상 관련 연구는 1980년 열전도도가 큰 액체나트륨을 냉각수로 사용하는 액체금속고속증식로에서 이러한 현상을 가속화할 수 있는지에 대해서 수

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 기계공학부

E-mail : ap0288@hanafos.com

행되었다⁽¹⁾. 열 경계층이동현상이 발생 가능한 영역으로는 열적 특성이 다른 고온-저온의 유체가 번갈아 가며 유입되어 접촉되는 T자형 관 및 상류에 연결된 곡관, 환관, 누설 있는 밸브와 연계된 계통 등으로 알려져 있다. 더욱이 상업운전중인 프랑스의 가압경수로 Civaux-1호기 및 고속증식로 PHOENIX에서 발생한 원자력발전소의 배관파손사건이후 열 경계층이동에 대한 연구는 주요 관심사가 되었으며 고주기 열 피로현상에 의한 평가는 매우 중요한 현안이다.^(2,3) 그러나 원자력산업을 주도적으로 수행하고 있는 한국과 미국은 체계적인 연구 및 정량적인 평가 기준이 정립되어 있지 않으며, 단지 필요에 의해 국부적인 평가가 과도한 가정 및 일부 실험적인 접근으로 시도되고 있는 실정이다. 한편, 일본에서는 최근에 혼합배관에서 발생하는 고주기 열 피로현상 평가를 위해 기준책정위원회를 설립하였으며 장기간 수행된 연구결과를 배경으로 평가지침을 수립하였다⁽⁴⁾. 이 평가지침은 현재 상용발전소인 가압경수로의 혼합 금속배관을 대상으로 평가기준을 제시하여 실험적 연구를 통한 열 경계층이동현상을 분석하여 그 결과를 설계에 반영하려는 노력을 지속적으로 하고 있으나 실험에서 요구되는 시간과 비용을 절감하기 위해서 설계의 최적화를 도모한 수치계산 및 평가를 통한 해석방법이 강하게 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 일반산업 설비 및 발전설비에서 쉽게 확인 가능한 혼합배관 유동장에 Large Eddy Simulation 난류모형을 적용하여 배관 내의 유체 및 배관 벽의 온도 변화 특성을 분석하고자 한다.

2. 지배방정식과 수치해석

LES 지배방정식은 공간적으로 평균화하고, 유동장

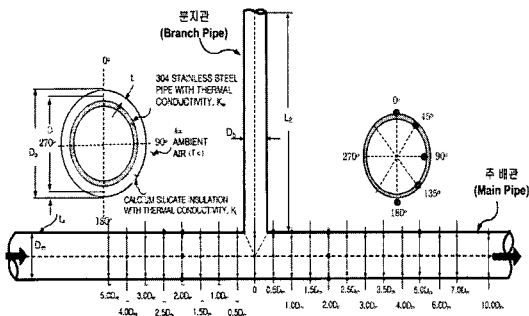


Fig. 1 The schematic of thermal stripping analysis in a mixing tee pipe

을 격자로 해석할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여 전자는 직접 계산하고 후자는 모델화하여 해석하는 방법이다. 격자가 충분히 작은 것이라면 격자 이하의 난류구조는 등방적이라고 간주할 수 있어 보편적인 모델을 구성하기 쉬운 특징을 갖고 있다. 또한 일반적인 난류모형은 난류에 의한 변동량을 시간평균 하는 것에 반해 LES에서는 시간평균을 이용하지 않기 때문에 시간변동이 빠른 비정상유동에 응용 가능하며, 격자로 해석되지 않는 작은 스케일의 와동에 대해서 아격자 모델을 도입한다. 지배방정식에 가우시안 필터 등의 공간적인 평균화 조작을 행하면 Sub-Grid Scale항으로 레이놀즈항, 교차항, 레오나드항이 나타나서, 각각에 대해서 모델화가 필요하다.

LES에서 아격자 유동의 $\overline{u_i}$ 는 필터링이 수행된 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 필터 폭보다 작은 와동의 효과는 $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$ 으로 정의되는 SGS 응력성분에 나타나며, 이를 적절하게 모델링한 SGS 와점성 모델은 SGS 응력 텐서의 비등방성 부분과 큰 스케일의 변형률 텐서 사이의 비례 관계를 가정하는 와 점성모델 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij}^a &= \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \\ &= -2\nu_T \overline{S_{ij}} = -\mu_T \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

차원 해석에 의하면 난류 와점성 계수는 속도 스케일과 길이 스케일의 곱으로 주어져야 한다. Smagorinsky⁽⁵⁾는 LES의 SGS 응력 성분에 와 점성모델을 처음으로 도입하여, 에너지 생성이 소산과 균형을 이루고 $l = C_s \Delta$ 의 관계가 있다는 가정 하에 식 (4), (5)와 같이 모델을 제안하였으나 Smagorinsky 상수 값은 여러 종류의 유동장에서 모두 다르게 나타나는 현상이 발견되어 모델의 적용 가능성을 크게 제한하게 되었다.

$$\mu_T = (C_s \Delta)^2 \overline{S} \quad (4)$$

$$\tau_{ij}^0 = -2C\Delta^2 \sqrt{S_{ij}} \quad (5)$$

단, $C = C_s^2$

$$\bar{S} = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}}$$

C_s : Smagorinsky 상수

이후 Lilly⁽⁶⁾와 Germano⁽⁷⁾가 외점성 계수가 미리 결정되지 않고, 계산이 진행되어 나가면서 자동적으로 공간의 함수로 계산되도록 하는 와 점성모델에 대한 식 (6)과 등방적인 난류유동상수인 C_s 값 0.23을 도출하였다. 그러나 이 상수 값은 천이 유동 또는 평균 전단유동이 있는 큰 규모의 요동에 있어서 과도한 감쇄 원인으로 알려져 있으므로 본 해석에서는 여러 유동조건에서 최상의 계산결과를 얻기 위해 가장 많이 사용되는 상수 값인 0.1을 사용하였다.

$$\mu_t = \rho L_s^2 \bar{S} \quad (6)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{S_{ij}S_{ji}} \cdot L_s \quad (7)$$

단, $L_s = \min(kd, C_s V^{1/3})$

본 연구에서는 전산유체유동코드인 FLUENT를 이용하여 분석을 수행하였다. 수치해석을 위한 경계조건 및 형상 자료는 미쓰비시시중공업에서 수행한 실험조건과 동일하게 하였으며 배관벽면을 통한 열전달이 없는 것으로 가정하여 단열조건을 적용하였다(8). 또한 배관 벽면의 유속에 대해 정지유속조건 및 벽면함수를 표면부근에 적용하였으며 대류항과 이산화황의 이산화법은 BCDS (Bounded Cental Differencing Scheme), 시간에 관한 계산은 Crank-Nicholson 이산화법을 사용하여 2차 정확도를 갖도록 하였다. 해석기법은 SIMPLEC를 기반으로 velocity-pressure coupling 기법을 사용하였다. 과도상태를 해석하기 위한 시간증분은 10-3초의 계산시간으로 하였으며 합류초기의 요동을 집중적으로 분석하기 위해서 약 3초 기간 동안을 계산시간으로 설정하였다. 수렴조건은 매 시간 단계에서 mass residual을 기준으로 5×10^{-4} 이상의 정확도를 유지하도록 하였다. 본 계산을 위하여 사용된 격자배열은 약 1,200,000~1,500,000으로 분할하였으며 경계면 부근에서 경계층 흐름특성을 효과적으로 관찰하기 위하여 비 엇갈림 격자 계를 적용하였다. 격자계의 구성은 경계부근, 유동영역 및 온도변화가 심한 벽면근처에 조밀하게 배열시켰다.

Table 1. Analysis Conditions

No.	$K(-)$	U_m (m/sec)	U_b (m/s)	Remarks
1	200	0.05	10	
2	50	0.1	5.0	
3	10	0.5	5.0	
4	1.0	1.0	1.0	
5	5.0	0.1	0.5	
6	5.0	1.0	5.0	
7	5.0	2.0	10	
8	0.1	5.0	0.5	
9	5.0	1.0	5.0	Diffuser
10	5.0	1.0	5.0	Elbow
11	5.0	1.0	5.0	Valve

3. 수치해석 모델 및 계산과정

고온과 저온의 유체가 번갈아 가며 유입되어 교차분류가 있는 혼합관 내의 유동장을 3차원으로 가정하여 분석하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 주관과 분기관을 통하여 주입된 유량이 수직방향으로 합류되는 유동장은 주 배관 직경 102 mm이고, 분기관의 직경 비는 0.2, 0.5 및 0.8인 1,000 mm의 길이를 갖는 공간에서 형성되었다. 이 해석공간은 원전에서 누출사고가 발생한 용접선이 위치한 합류지점 하단 160 mm 지점을 충분히 포함할 수 있도록 Fig. 1과 같이 모델링하였다. 저온부와 고온부에서 유입되는 압력과 온도는 각각 대기압이고, 30 °C와 70 °C 및 94 °C로 주입된다. 유속비와 주 배관 속도는 Table 1과 같이 실제 원자력발전소 상업운전조건과 동일하게 선정하였다.

유체온도를 얻기 위해 0°, 45°, 90°, 135° 및 180°의 주 배관 벽면 주위에서 $y = -3$ mm, 온도요동에 의한 열전달계수를 얻기 위해서 배관 내부표면에서 $y = 0.5$ mm, 3.25 mm 지점의 값을 사용하였다. 온도요동시험의 열전달계수와 유체온도를 얻기 위한 위치는 Fig. 1과 같으며, 각각의 유체온도를 식 (8), (10)을 이용하여 평균온도 및 요동온도로 변환하여 정형화하였다.

$$T^* = \frac{(T - T_c)}{(T_h - T_c)} \quad (8)$$

어떤 주어진 위치에서 정형화된 시간평균온도는 식 (9)를 이용하여 계산하였다.

$$\overline{T^*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T^* \quad (9)$$

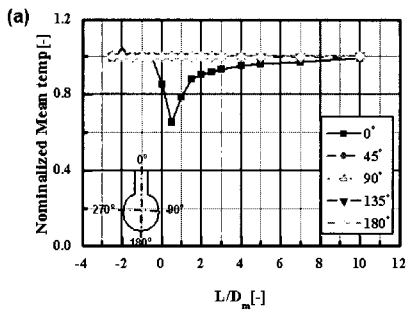
정형화 된 요동온도 또는 시간평균 온도요동 세기는 주어진 위치에서 아래와 같이 계산된 유체온도에 제곱 평균하여 계산한다.

$$T_s^* = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i^* - \overline{T^*})^2} \quad (10)$$

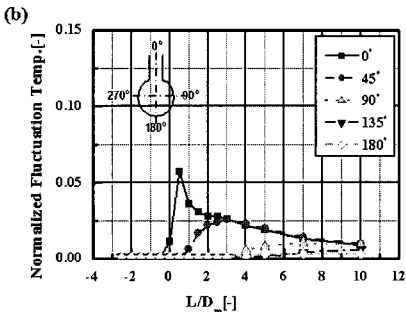
4. 해석 결과 및 고찰

4.1. 유체 온도 요동특성

유선방향에 따른 정형화된 평균온도 및 요동온도 특성을 Fig. 3~Fig. 9에 나타내었다. Fig. 3과 같이 유속 비가 0.1인 경우에 주배관의 상류영역으로 흐르는 분지관의 저온유체는 주 배관 유동의 영향으로 인해서 벽면 분류유동이 형성하게 된다. 이러한 유동현상 때문에 영향을 받는 것은 0도에서 평균온도뿐이며, 온도요동의 크기는 유체의 혼합영역인 $L/D_m=0.5$ 에서 가장 크게 형

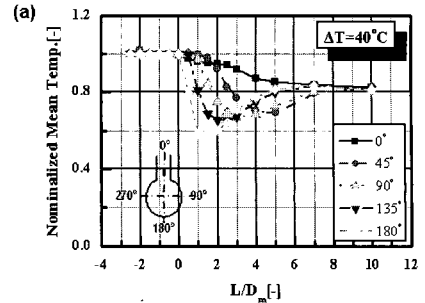


(a) Mean Temperature

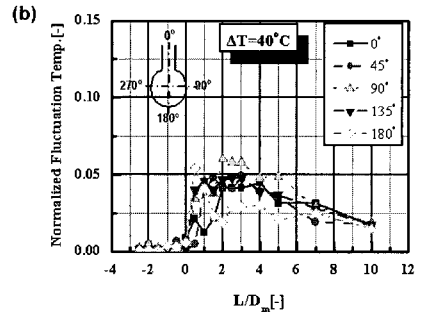


(b) Fluctuation Temperature

Fig. 3 Temperature Distribution ($K=0.1$, $U_m=5.0$ m/s)

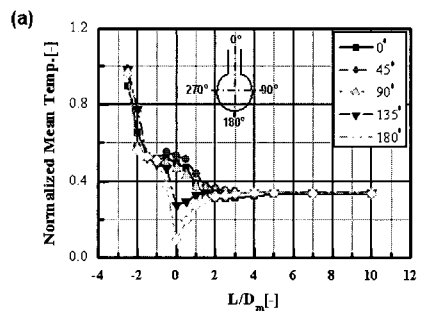


(a) Mean Temperature

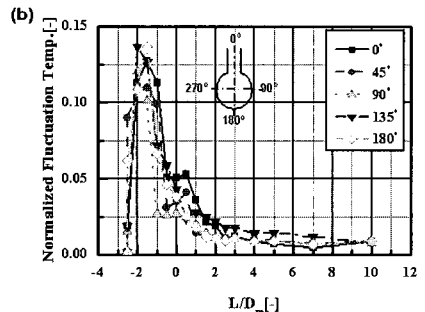


(b) Fluctuation Temperature

Fig. 4 Temperature Distribution ($K=5.0$, $U_m=1.0$ m/s)

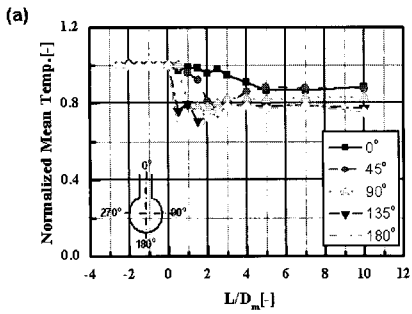


(a) Mean Temperature

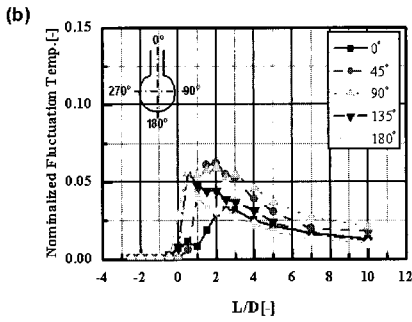


(b) Fluctuation Temperature

Fig. 5 Temperature Distribution ($K=50$, $U_m=0.1$ m/s)

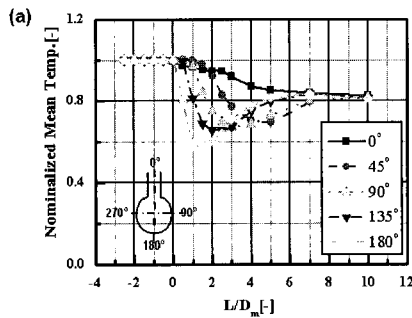


(a) Mean Temperature

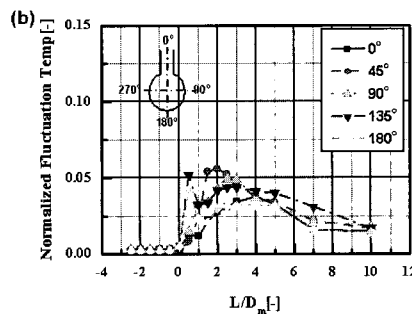


(b) Fluctuation Temperature

Fig. 6 Temperature Distribution ($K=5.0, U_m=0.1$ m/s)

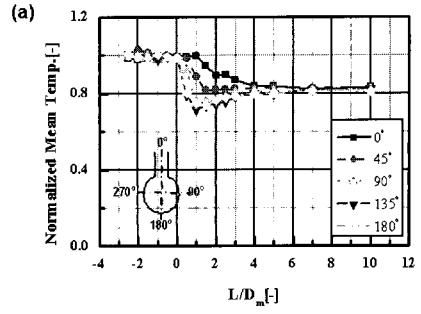


(a) Mean Temperature

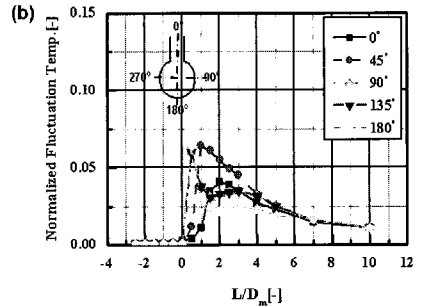


(b) Fluctuation Temperature

Fig. 7 Temperature Distribution ($K=5.0, U_m=2.0$ m/s)

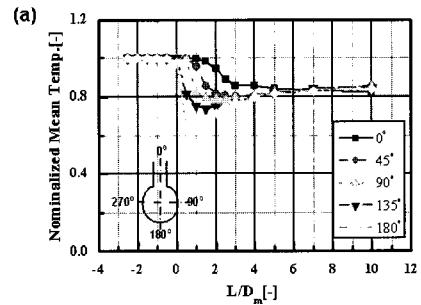


(a) Mean Temperature

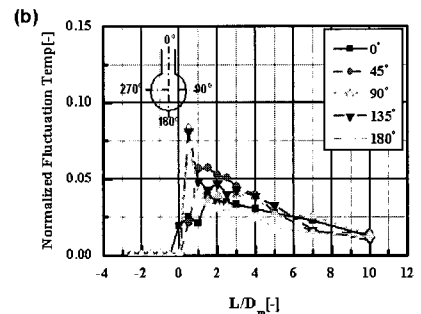


(b) Fluctuation Temperature

Fig. 8 Temperature Distribution with Elbow ($K=5.0, U_m=1.0$ m/s)



(a) Mean Temperature



(b) Fluctuation Temperature

Fig. 9 Temperature Distribution with Valve ($K=5.0, U_m=1.0$ m/s)

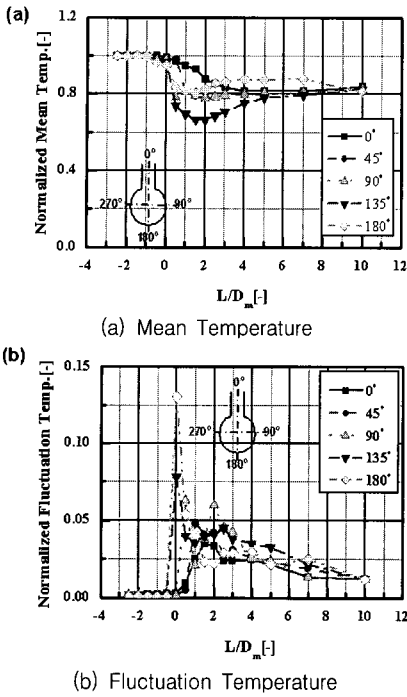


Fig. 10 Temperature Distribution with Diffuser (K=5.0, $U_m=1.0$ m/s)

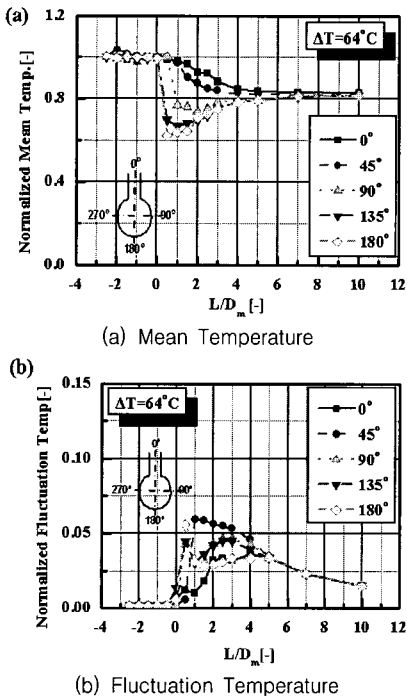


Fig. 11 Temperature Distribution with Consideration of Mean Temp. Difference (K=5, $U_m=1.0$ m/s) $U_m=1.0$ m/s)

성되었으며 유체의 흐름방향에 따라 작아짐을 알 수 있다. 유속비가 5.0인 경우의 해석결과 Fig. 4는 저온 유체인 분지관의 유동이 고온인 주 배관의 유동을 관통하여 주 배관 유동에 의해서 혼합된 이후 주 배관 내부 벽으로 분사되는 유동현상을 보인다. 이 유동현상에 따라 저온의 분지관 유체로 인하여 평균온도차가 발생하는 곳은 유체의 흐름방향에 따른 각도를 이루는 방향으로 배관 하부에서 상부로 이동한다. 이것은 주 배관에 유입되는 유량에 충돌한 이후에 저온의 분지관 유체 흐름을 알 수 있다. 온도요동 특성은 혼합영역 (T자 형관 연결부)인 $L/D_m=0.5$ 에서 4까지 크게 증가하여 하류영역으로 멀어질수록 감소함을 보였다. Fig. 5는 저온의 분지관 유량이 주배관 내부의 180도가 되는 위치의 벽을 직접 충돌 분사한 이후 주 배관의 유체흐름 방향의 후방영역인 $L/D_m=-2$ 부분으로 침투하는 유동현상을 보였다. 이러한 유동현상은 저온의 분지관에 흐르는 유체 속도가 주 배관으로 흐르는 유체의 속도보다 상대적으로 아주 크기 때문이며, 온도요동 세기가 가장 크게 발생하는 영역이 유체의 흐름방향에 따라 평균온도 구배가 가장 큼을 알 수 있다. 이러한 현상은 다른 유속비를 갖는 모든 해석조건에서도 동일함을 알 수 있다.

4.2. 주 배관 유속에 의한 영향

주 배관 유속에 의한 영향은 유속비가 5.0인 동일한 조건으로 하여 해석을 수행하였다. Figs. 4, 6 및 7은 주 배관 유속이 각각 0.1 m/s, 1 m/s 및 2 m/s인 경우, 평균 및 온도요동 분포를 나타낸 것이다. 주 배관 유속 및 양 유체의 속도가 작은 경우에 유동현상은 유체에 작용하는 관성력에 비해서 부력이 지배적으로 작용하게 된다. 주 배관 유속이 0.1 m/s인 경우는 Fig. 6과 같이 유체가 혼합된 이후 하향유로 영역인 $L/D_m=4$ 에서부터 안정한 상태로 열성층이 형성됨을 알 수 있으며, 온도요동의 세기가 가장 큰 영역은 고온-저온이 혼합경계인 90도 방향 근방에서 $L/D_m=0$ 에서 2까지 해당되는 영역임을 알 수 있었다. Figs. 4와 7에서와 같이 주 배관 유속이 1.0 m/s, 2 m/s인 경우에 대한 결과도 Fig. 6과 거의 동일함을 알 수 있다. 그러므로 주 배관 유속에 의한 영향은 부력이 무시된다면 매우 작음을 알 수 있다.

4.3. 입구 평균온도차의 영향

입구 평균온도차에 대한 영향을 평가하기 위한 해석

조건은 유속비 5.0, 주 배관 유속 1m/s로 동일하게 하였으며, 주 배관과 분지관에 유입되는 평균온도를 40℃와 64℃로 설정하여 해석하였다. 그 결과 Fig. 4와 Fig. 11과 같이 동일하게 혼합영역 근방인 $L/D_m=0.5$ 에서 4까지 온도요동이 크게 증가하다가 하류영역으로 멀어질수록 감소함을 보였다. 그러므로 입구 평균온도차에 따른 평균온도 및 온도요동 특성에 대한 해석결과는 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

4.4. 상류 배관에 설치된 기기의 영향

Figure 2와 같이 상류배관에 직경비가 1.3인 확관은 주 배관 상류의 $L/D_m=-2$ 영역에 설치하였고, 완전 개방 조건의 짧은 곡관 및 글로브밸브, 확관을 분지관 상류의 유로방향으로 $L/D_b=-2$ 영역에 설치하였다. 유속비가 5인 상류배관에 설치된 기기에 주 배관의 유속이 1.0m/s로 유입될 경우의 평균 및 온도요동 분포특성은 Fig. 8~Fig. 10에 각각 나타내었다. 분지관에 설치된 확관을 제외한 평균 및 온도요동 분포 특성은 상류에 기기가 설치되어 있지 않은 경우의 해석결과인 Fig. 4와 거의 동일하였으나, 분지관 상류기기를 통과한 이후 발생된 충돌분류속도가 상류기기가 없을 때보다 컸기 때문에 고온-저온의 혼합점이 주배관의 상류영역으로 아주 작게 이동되었음을 알 수 있다. 상류에 설치된 확관의 경우는 상류기기가인 확관을 통과한 이후 분지관에서 발달된 유동장의 길이가 너무 짧기 때문에 확관이 있는 분지관에서 충돌분류속도는 상류기기가 없을 때보다 더 크게 나타났다. 발생영역은 주로 주 배관과 분지관이 교차하는 혼합영역 근방임을 알 수 있다.

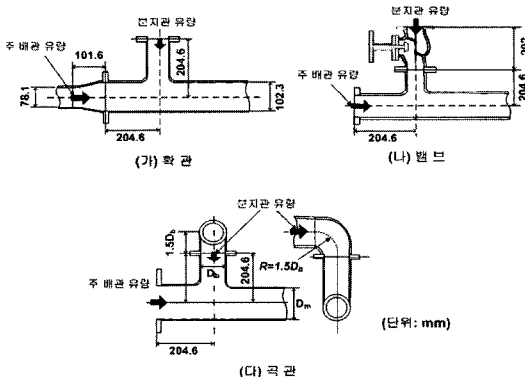


Fig. 2 Upstream piping elements

4.5. 유체 온도요동의 주파수 특성

해석 결과 Fig. 11은 유속비 0.1, 1.0 및 2.0에 대한 큰 유체온도 요동의 맥 스펙트럼합수 밀도를 식 (11), (12)를 이용하여 정형화하였다.

$$\Phi(S) = \frac{Sp_f(f)}{T_s^2} \cdot \frac{U_m}{D} \quad (11)$$

$$S = \frac{fD}{(U_m)} \quad (12)$$

수치해석 결과 명확히 피크 성분을 갖는 해석조건이 없었으며, 모든 해석조건에 대해서 주파수 특성은 일정

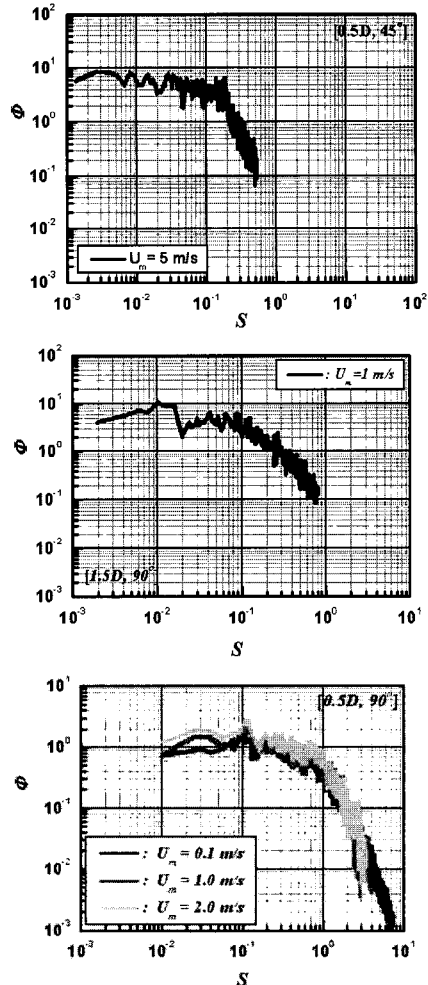


Fig. 11 Normalized PSD of Temperature Fluctuation

하지 않았다. 유속비가 0.5 및 5.0의 경우에 대한 정형화한 벽 스펙트럼에 의한 주 배관 속도의 영향은 매우 작았으며, 온도요동 주파수는 유속에 비례하여 증가함을 알았다.

4.6. 비정상상태의 열전달계수 평가

비정상상태 열전달계수는 벽 스펙트럼 방법(9)에 의해서 평가하였다. 이 방법은 구조물의 온도분포를 1차

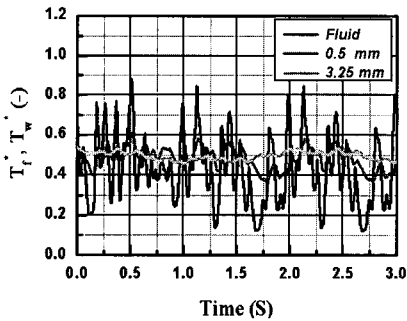


Fig. 12 Time History of Fluid and Structure

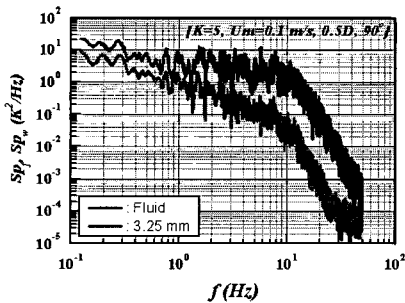


Fig. 13 PSD of Fluid and Structure Temperature

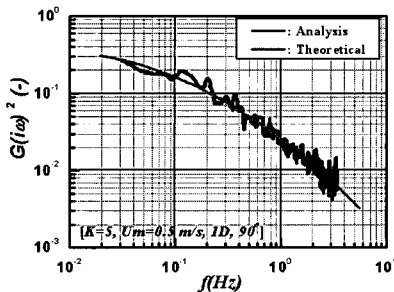


Fig. 14. Frequency Response Fluctuation

원 열전도모델링으로 하여 가정하였다. 구조물 온도요동의 벽 스펙트럼 밀도 $Sp_w(\omega)$ 는 식 (13)과 같다.

$$Sp_w(\omega) = |G(i\omega)|^2 \cdot Sp_f(\omega), \quad (13)$$

이론적인 주파수 응답함수($G(i\omega)$)는 식 (14)과 같이 유도된다.

$$|G(i\omega)|^2 = \frac{\exp(-c\gamma)}{2e^2 + 2e + 1} \quad (14)$$

$$\text{단, } e = \sqrt{\pi\rho C_{pw}k_w f / h},$$

$$c = \sqrt{4\pi\rho_w C_{pw}f / k_w}$$

주파수응답함수는 유체 및 구조물의 벽 스펙트럼 밀도를 계산 후 열전달계수는 해석적인 것에 이론적인 주파수응답함수에 곡선적합기법 (curve fitting)에 의해서 결정되었다. 주관유속이 1.0 m/s로 유속비가 1.0인 경우의 열전달계수 평가 절차는 주배관 $L/D_m=1.0$ 인 영역의 90° 방향에 있는 배관 벽 내부표면에서 $y=-3$ mm인 유체영역과 $y=0.5$ 및 3.25 mm인 구조물영역의 유체온도요동에 대한 시간이력은 Fig. 12와 같다. 배관 벽 구조물 내의 온도요동 크기는 유체영역 보다는 감소되었으며, 해석/측정영역인 배관 벽의 깊이가 커짐에 따라서 위상이 지연되었다. Fig. 13과 같이 유체 및 구조물에 대한 해석/측정영역의 온도요동의 벽 스펙트럼 밀도는 배관 벽의 깊이가 커짐에 따라서 감소되고, 주파수가 커짐에 따라서는 증가된다. 배관 벽의 깊이 $y=3.25$ mm인 영역의 모의 해석결과와 식 (14)을 이용하여 곡선적합기법으로 나타난 주파수응답함수는 Fig. 14와 같다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 배관 벽 내부표면에서 $y=-3$ mm인 유체영역과 $y=0.5$ mm, 3.25 mm인 구조물영역의 유체온도요동에 대한 시간이력은 유한요소법에 의한 유체온도요동과 예측된 열전달계수를 사용하여 계산되었다. 이것은 예측된 열전달계수를 명확히 평가하기 위해서 수행했다. 배관벽 내부표면 $y=0.5$, 및 3.25 mm에서 구조물의 열적 물성치인 밀도, 비열 및 열전도율을 사용하여 해석을 수행하여 혼합관의 열 경계층 이동현상평가에 대한 데이터베이스를 구축하기 위해, 열전달 증배계수를 식 (15)과 같이 정의한다.

$$F_p = \frac{h}{h_o} \quad (15)$$

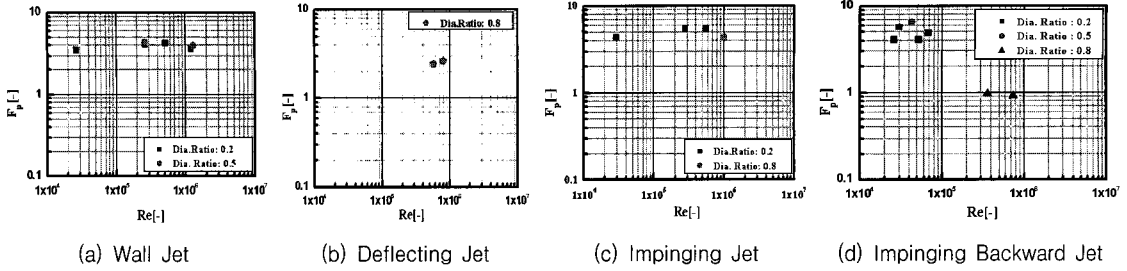


Fig. 15 The maximum Multiplier Ratio of Heat Transfer Amplification Coefficient

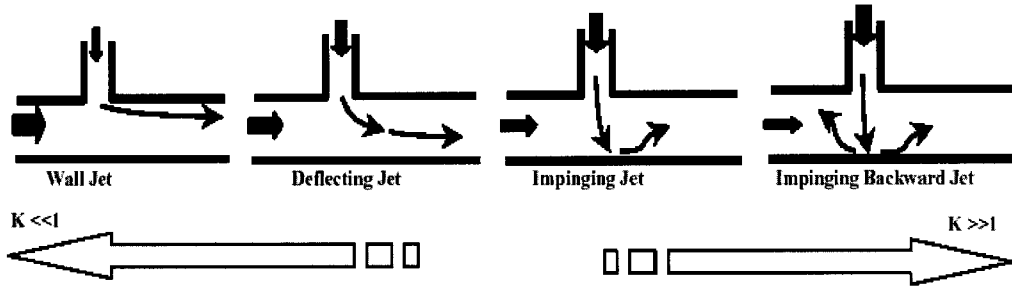


Fig. 16 Overview of Mixing Flow Pattern

여기서 h_0 는 균일하게 발달된 원형관 내 난류유동에 대한 열전달식으로서, Dittus-Boelter 식을 정상 열전달의 기본 식으로 한다.

$$N = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (16)$$

혼합 이후 온도 및 평균속도를 기준으로 하여 식 (16)에 의해 구한 안정한 열전달계수는 약 $4.6 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 이며, 맥 스펙트럼방법에 의한 비안정상상태 열전달계수는 약 $1.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 이다. 이결과를 명확히 하기 위하여 열전도 해석을 수행하였다. 맥 스펙트럼을 이용한 비정상상태 열전달계수는 모든 조건의 측정위치에서 평가하였으며, 비안정상상태에 대한 열전달 배수비는 Fig. 16과 같다. 열전달 계수는 구조 건전성 관점에서는 열전달 값이 큰 것이 더 보수적이므로, 각각의 조건에서 배수비는 최대값으로 나타냈다. Fig. 17은 각각의 유동형태⁽¹⁰⁾ 즉, 벽면 분류 (wall jet), 편향분류 (deflecting jet), 충돌분류 (impinging jet) 및 충돌 후류 (impinging backward jet)를 나타내고 있다. 이 유동형태는 식 (17)과 같이 주 배관 유량과 분기관 유량의 운동량 (momentum) 비에 의해서 정리된다.

$$M_R = \frac{M_m}{M_b} = \frac{\rho_m V_m^2 D_m D_b}{\rho_b V_b^2 \cdot \pi D_b (D_b/2)^2} \quad (17)$$

각각의 유량형태에 따른 운동량 비의 범위는 다음과 같다.

- $1.4 < M_R$: Wall Jet,
- $0.35 < M_R < 1.4$: Deflecting jet
- $0.062 < M_R < 0.25$: Impinging jet
- $M_R < 0.062$: Impinging backward jet

혼합직경비가 다른 배관의 배수비는 약 4에서 6이고, 동일한 직경의 혼합 배수비는 약 1.5⁽¹¹⁾이다. 이 차이는 고온-저온수가 혼합된 이후에 균일한 유동분포를 형성하기 어렵기 때문으로 알려져 있다.

5. 결 론

본 연구는 고온-저온수가 혼합되는 배관계통의 혼합관을 대상으로 내의 열 경계층이동 현상은 내부 난류유동에 따른 고주기 열 피로에 대한 설계평가를 위해서 난류 전산수치해석 기법인 LES 모델을 혼합배관 내 유

동장에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유체온도 요동특성은 유동속도의 절대 값 보다는 유체의 속도비에 의해서 결정된다.
2. 주 배관의 유속 및 양 배관의 입구 평균온도차는 온도요동 특성에 미치는 영향이 매우 작다.
3. 유체온도 요동은 혼합점 근처에서 가장 크게 발생하였으며 요동주파수는 임의적(random)이다.
4. 상류에 설치된 곡관 및 밸브는 온도요동특성에 미치는 영향이 매우 작다.
5. 비안정상상태에 대한 열전달계수의 배수비 (multiplier ratio)는 약 4에서 6이다.

사용기호

D	: 배관 내경 (m)
C_p	: 일정압력에서 비열 (J/kg K)
F_p	: 열전달 배수비 (-)
f	: 주파수 (Hz)
G	: 주파수 응답함수 (-)
h	: 열전달계수 (W/m ² K)
K	: 유속 비 (-)
k	: 열전도율 (W/m K)
Nu	: 누셀 수 (-)
Pr	: 프랜틀 수 (-)
Re	: 레이놀즈 수 (-)
S	: 정형화된 주파수 fD/U_m (-)
Sp	: 요동온도의 맥스펙트럼 밀도함수 (K ² /Hz)
T	: 온도 (K)
T^*	: 정형화된 온도 (-)
U	: 유체속도 성분 (m/s)
ΔT_{in}	: 양 배관의 유입온도 차 (K)
x, y, z	: 좌표성분 (m)
ϕ	: 유체온도요동의 정형화된 스펙트럼 (-)
θ	: 원주방향의 각도 (deg)
ρ	: 밀도 (kg/m ³)
ω	: 각 속도 (rad)

하첨자

b	: 분지관
m	: 주 배관
f	: 유체
c	: 저온수

$mean$: 평균 값
rms	: rms 값
w	: 구조물

참고문헌

- (1) Muramatsu, T., Ninikata, H., 1996, "Development of Thermohydraulics Computer Programs for Thermal Striping Phenomena," Nuclear Technology 113, pp. 54~72.
- (2) C. Faigy, 2002, "High Cycle Thermal Fatigue: Lessons Learned from CIVAUX Event," 2nd International Conference of Fatigue of Reactor Components, Snowbird, Utah, July 29-31.
- (3) C. Faigy, 2002, "La Fatigue Thermique Dams Les Centrares Nuclearires: Enseignement Du Retour D'Experience," Fontevraud 5, Contribution of Materials Investigation to the Resolution of Problems Encountered in PWRs, Fontevrand, France, September.
- (4) Fukuda, T., et. al., 2003, "Current Effort to Establish a JSME code the Evaluation of High-Cycle thermal Fatigue, In: 11th International Conference on Nuclear Engineering," ICONE-11, Tokyo, Japan, April 20-23.
- (5) Smagorinsky, J., 1963, "General Circulation Experiments with the Primitive Equationa, I. The Basic Experiment," Monthly Weather Review, Vol. 91, NO. 3, pp. 99~164.
- (6) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., 1991, "A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model," Phys. Fluids A, Vol. 3, pp. 1760~1765.
- (7) Lilly, D. K., 1992, "A proposed modification of the Fermano Subgrid-Scale Closure Method," Phys. Fluids A, Vol. 4, pp. 633~635.
- (8) K. Tanimoto, et. al., 2002, "Experimental Study on Thermal Striping in a Mixing Tee with Hot and Cold water," 3rd Korea-Japan symposium in nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Kyengju, Korea, Oct. 13-16.
- (9) Ogura, K. et. al., 2001, "Evaluation of unsteady Heat trans Coefficient Using a power Spec-

- trum method-prediction method of Heat Transfer Coefficient-," 2001 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan 140.
- (10) Igarashi, M. et. al., 2002, "Experimental Study on Fluid Mixing for Evaluation of Thermal striping in T-Pipe Junction," ICONE 10-22255.
- (11) Kawabe, T. et. al., 2002, "Evaluation Study on Thermal Striping in Mixing Tee with Hot and Cold Water (Type B: Characteristics of Flow Visualization and temperature Fluctuations in Mixing Tees with Same Pipe Diameters," NTHAS3.