

대외동모사법을 사용한 고속로 상부플레넘에서의 thermal striping 해석

최 석 기,* 한 지 응, 김 대 희, 이 태 호

한국원자력연구원 고속로설계부

LARGE EDDY SIMULATION OF THERMAL STRIPING IN THE UPPER PLENUM OF FAST REACTOR

S.K. Choi,* J.W. Han, D. Kim and T.H. Lee

Fast Reactor Design Division, Korea Atomic Energy Research Institute

A computational study of a thermal striping in the upper plenum of PGSFR(Prototype Generation-IV Sodium-cooled Fast Reactor) being developed at the KAERI(Korea Atomic Energy Research Institute) is presented. The LES(Large Eddy Simulation) approach is employed for the simulation of thermal striping in the upper plenum of the PGSFR. The LES is performed using the WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity) model. More than 19.7 million unstructured elements are generated in upper plenum region of the PGSFR using the CFX-Mesh commercial code. The time-averaged velocity components and temperature field in the complicated upper plenum of the PGSFR are presented. The time history of temperature fluctuation at the eight locations of solid walls of UIS(Upper Internal Structure) and IHX(Intermediate Heat eXchanger) are additionally stored. It has been confirmed that the most vulnerable regions to thermal striping are the first plate of UIS. From the temporal variation of temperature at the solid walls, it was possible to find the locations where the thermal stress is large and need to assess whether the solid structures can endure the thermal stress during the reactor life time.

Key Words : Thermal Striping, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 대외동모사법(Large Eddy Simulation), 고속원자로(Fast Nuclear Reactor)

1. 서 론

한국원자력연구원에서 개발 중인 150 MWe급 소듐 냉각 고속로(PGSFR:Prototype GEN-IV Sodium-cooled Fast Reactor)는 사용한 것보다 더 많은 양의 핵연료를 생산하여 기존의 원자력발전소보다 핵연료 이용률을 60배 이상 증대시켜 안정적인 에너지를 공급할 뿐만 아니라, 기존의 원자력발전소 보다 고준위 방사성 폐기물 처분량을 획기적으로 감소시켜 깨끗한 에너지를 공급하는 차세대 원자로이다.

온도가 다른 두 유동이 혼합하면 온도요동을 일으키고 고

체물체에 열피로 현상을 유발하는 것을 thermal striping 현상이라고 한다. 소듐 냉각 고속로 상부에는 노심 농축도의 차이 및 제어봉 집합체와 연료봉 집합체간의 온도차이 등으로 불규칙한 온도 요동 특성을 형성하여 노심상부 구조물에 열피로 현상을 유발한다. 고온플에서 발생하는 온도의 요동은 구조물로 전달되는데 주요한 영향인자는 온도요동의 진폭(amplitude)과 주기(frequency)인 것으로 규명된다. 온도요동 주기가 비교적 작은 경우에는 인접한 구조물에 전달될 수 있는 충분한 시간이 제공되므로 이러한 저 주기의 온도변화 특성이 그 크기, 즉 진폭이 큰 지점에서는 구조물의 온도변화를 현저하게 일으킬 수 있다고 알려져 있다. 따라서 이러한 현상을 올바르게 분석하는 것은 thermal striping 현상을 미연에 방지하여 가능한 열피로의 발생을 차단할 수 있는 설계를 수행하는 선결요건이 된다.

Thermal striping 현상을 분석하기 위해서는 첫째로 전체 유

Received: September 24, 2014, Revised: December 5, 2014,

Accepted: December 5, 2014.

* Corresponding author, E-mail: skchoi@kaeri.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.4.029>

© KSCFE 2014

동장의 특성을 파악하고, 둘째로 고체 면으로의 열전달 특성을 지배하는 온도의 시간에 따른 요동 데이터를 확보해야 하는 두 가지 중요한 요소를 만족할 수 있는 방법론이 필요하다. 정상상태 전체유동장의 유동특성 파악은 난류모델을 사용하여 신뢰성 있고 신속한 예측을 수행할 수 있으며, 계산된 온도요동 진폭 및 주기의 정확성은 사용된 난류모델의 정확성에 의존된다. 그러나 이 방법은 thermal striping 현상의 주요 인자인 온도요동의 주기를 정확하게 구할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 온도변화의 주기와 진폭을 도출할 수 있는 시간에 따른 온도의 함수관계를 구하기 위하여 LES(Large Eddy Simulation)를 이용한 해석 방법을 사용하고 있다.

한국원자력연구원에서는 고속로 상부플레넘에서 발생하는 thermal striping 현상을 이해하기 위해 다양한 연구를 진행하여 왔다. Nam and Kim[1]은 thermal striping 현상을 이해하고 난류모델과 LES를 검증하기 위한 실험 데이터를 제공하기 위하여 상세한 실험을 수행하였다. 시험 영역의 형태는 평면이중제트(planar double jet)와 평면삼중제트(planar triple jet)이고 작동유체는 공기이며, 다양한 입구 온도와 속도조건에 대해 실험을 수행하였다. Choi and Kim[2]은 Nam and Kim[1]에 의해 수행된 실험에 대해 수치해석을 수행하였다. 그들은 thermal striping을 예측함에 있어 난류모델의 영향을 연구하였으며, 현재 많은 연구에서 사용되고 있는 세 가지 난류모델인 이층(two-layer)모델[3], SST(Shear Stress Transport)모델[4] 그리고 타원이완모델(elliptic relaxation model)[5]을 이용하여 계산을 수행하였다. 그들은 타원이완모델 만이 온도요동 현상을 예측할 수 있음을 보여주었다. 그러나 계산된 온도요동의 진폭은 실험치 보다 훨씬 적었다. 이는 최근 RANS 모델의 성공에도 불구하고 온도요동을 정확하게 예측할 수 있는 검증된 난류모델이 없음을 보여준다. 영국의 Warwick 대학과 한국원자력연구원과 공동으로 수행된 Chacko et al.[6]의 연구는 같은 Nam and Kim[1]의 실험에 대하여 RANS 및 LES 해석을 수행하였으며, 이들의 결과는 LES는 온도요동의 진동을 정확하게 예측함을 보였다. 반면, realizable 난류모델[7]은 진폭과 진동수를 매우 부정확하게 예측하였다. 이는 thermal striping 해석에서 온도요동의 주기 및 진폭의 예측은 LES가 가장 적절한 계산방법임을 보여준다. 본 연구에서는 이 LES 방법을 사용하여 실제 원자로에서의 thermal striping 현상을 해석하고자 한다. 대상 원자로는 현재 한국원자력연구원에서 설계 중인 PGSRF이다.

본 연구에서는 PGSRF의 상부플레넘에 위치한 고온풀에서의 구조적 건전성을 확보하기 위하여 thermal striping 현상을 해석하고, thermal striping 현상이 현저하게 발생할 가능성이 있는 부분을 파악하고자 한다. LES 해석을 통하여 thermal striping 현상의 주요 인자인 온도요동의 주기 및 진폭을 해석

하여 비교하였으며, thermal striping 현상이 고려되어야 하는 부분들의 위치를 파악하였다.

2. 수치해석방법

2.1 지배방정식

2.1.1 LES

LES에서 비압축성 유체에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존법칙의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{U}_j) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j) \\ = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) - \rho \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\Theta}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{U}_j \bar{\Theta}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\kappa}{C_p} \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_j} \right) - \rho \frac{\partial \bar{h}_j}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \bar{f} 는 여과(filter)된 양으로 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{f}(x_i, t) = \iiint_{Vol} G(x_i - x'_i) f(x'_i, t) dx'_i \quad (4)$$

여기서 Vol는 제어체적 부피이며, G는 필터함수이다. 필터함수는 spectral cutoff filter, gaussian filter, box filter 등 여러 가지 종류가 있는데, 본 연구에서는 CFX-13에서 제공하는 box filter를 사용하였다.

식 (2)의 $\bar{\tau}_{ij}$ 와 식 (3)의 \bar{h}_j 는 다음과 같다.

$$\bar{\tau}_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \bar{\tau}_{kk} = -2\nu_t S_{ij} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\bar{h}_j = -\frac{\nu_t}{Pr_t} \left(\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

본 연구에서는 eddy viscosity 모델로는 CFX 코드에서 제공하는 모델 중 하나인 WALE 모델을 사용하였다. WALE 모델을 수식으로 표현하면 아래와 같다.

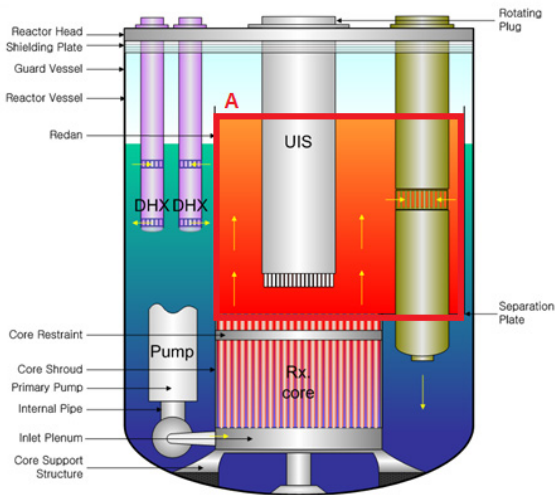


Fig. 1 Schematic diagram of primary heat transport system

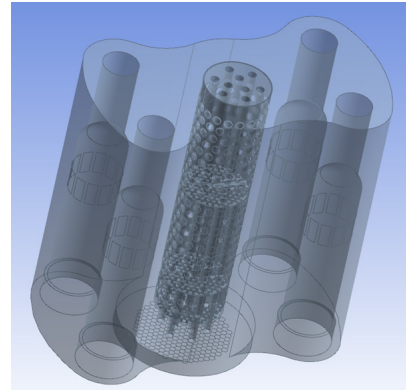


Fig. 2 Overall view of hot pool

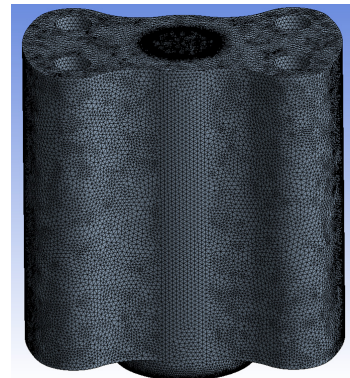


Fig. 3 Overall numerical grid

$$\overline{\nu}_t = (C_w \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (7)$$

$$S_{ij}^d = \overline{S_{ik} S_{ki}} + \overline{\Omega_{ik} \Omega_{ki}} - \frac{1}{3} \delta_{ij} (\overline{S_{mn} S_{mn}} - \overline{\Omega_{mn} \Omega_{mn}}) \quad (8)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\overline{\Omega_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

위 식에서 $\Delta = (Vol)^{1/3}$ 이고, $C_w = 0.5$ 이다.

2.2 해석범위

본 연구에서는 소듐 냉각 고속로 상부플레넘의 고온풀을 대상으로 한다. 고온풀에는 복잡한 형상의 주요 기기들이 위치하고 있으며, 4개의 중간열교환기(IHX)와 온도요동 현상을 주의 깊게 관찰해야 하는 상부내부구조물(UIS: Upper Internal Structure) 등이 있다. 일차열전달계통을 Fig. 1에 나타내었으며, 이 그림의 A-영역을 해석영역으로 정하였다. Fig. 2에는 해석 영역을 상용 CAD 프로그램인 CATIA를 사용하여 생성한 모습을 나타내었다.

2.3 수치격자

해석영역의 격자구성은 상용프로그램인 CFX-Mesh를 사용

하여 생성하였으며, 생성된 격자의 정보는 아래 Table 1에 나타내었다. Fig. 3는 계산에 사용된 전체적인 수치격자를 보인다. 고체물 근처에 조밀한 격자를 사용하여 첫 격자의 위치는 $y=10-30$ 정도가 되도록 하였다.

2.4 경계조건

해석영역의 밑면에 위치한 253개의 연료봉을 통하여 유체가 유입된다. 연료봉은 각각의 서로 다른 출구 유량 및 출구 온도 조건을 가지고 있다. 출구유량과 온도는 노심설계의 결과를 사용하여 적용하였다, 계산영역의 출구는 중간열교환기

Table 1 The number of nodes and elements for the computational domain

	Node	Element
Tetrahedra	-	18,279,877
Pyramids	-	44,026
Wedges	-	1,445,427
Total	4,036,193	19,769,330

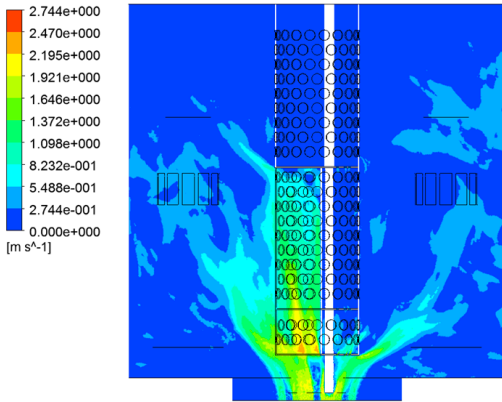


Fig. 4 Velocity contour(x-axis plane)

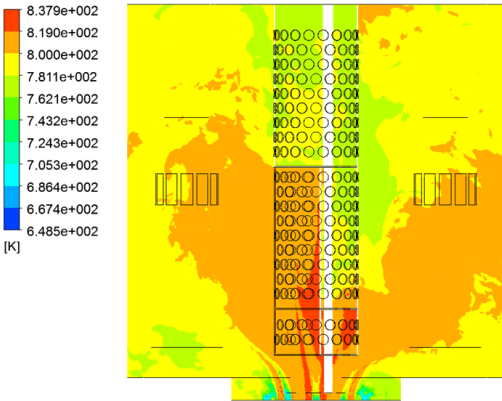


Fig. 5 Temperature contour(x-axis plane)

입구이고, 이곳에서의 출구조건은 압력 경계조건을 사용하였다. 본 연구에서는 고체 면에서의 경계조건은 단열로 처리하였다. 열성층(thermal stratification) 현상과 달리 thermal striping 해석에서 고체 면에서의 경계조건을 단열로 처리하는 것은 큰 문제가 없다. 단열조건은 유체의 온도요동이 그대로 고체 표면에 전달된다는 가정이다. 벽면 바로 근처에서 온도 요동의 감쇄(attenuation)가 생길 수 있으나, 이것을 무시한 본연구의 계산결과는 보다 보수적인 계산결과이다. 그리고 자유표면에서는 수직방향 속도성분이 영(zero)이고, 수평방향 속도성분은 대칭조건을 사용하였다. 이 방법은 고속로 열수력 해석에서 통상적으로 사용되는 방법이다. Thermal striping 현상은 원자로 노심 바로 위에서 발생하므로 멀리 떨어진 자유표면의 효과는 미미하다.

2.5 해석방법

본 연구에서의 LES해석은 상용코드인 CFX-13을 사용하여

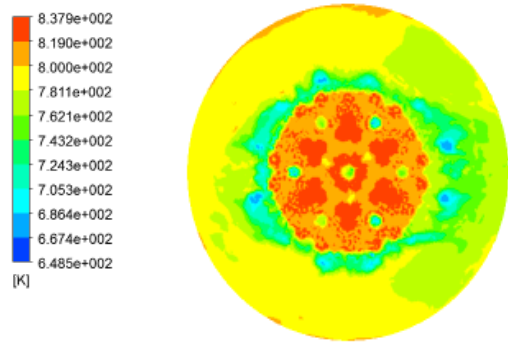


Fig. 6 Temperature contour at z=-9720 mm

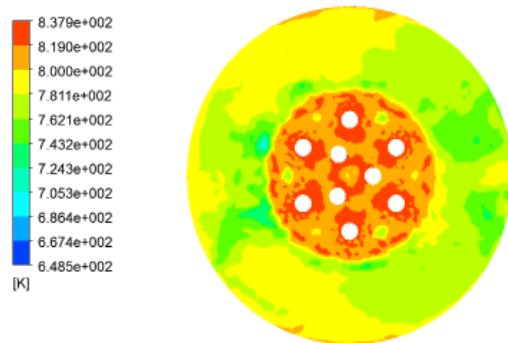


Fig. 7 Temperature contour at z=-9300 mm

수행하였다. LES해석은 CFX코드에서 제공되는 WALE 모델을 사용하였으며, 시간구간(time step)은 난류모델을 사용한 해석보다 훨씬 작은 0.0005초로 설정하였다. 대류항처리법은 중앙차분법(central difference scheme)을 사용하였고, 비정상항은 오일러의 이차후향기법(second-order backward Euler scheme)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간평균 유동속도 및 온도분포

계산은 시간구간 $\Delta t = 0.0005$ 초를 사용하여 25초까지 수행하였고, 시간 평균값은 최후 5초간(20초-25초)에 대하여 시간 평균값을 구하였습니다. 그러므로 샘플링 수는 10000개다. 시간 평균된 속도 및 온도분포를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 유동의 속도분포를 보면 해석영역 밑바닥에 위치한 노심 출구로부터 유입된 많은 유량이 UIS의 측면의 그자 형태의 홈으로 빠져나가며, 일부는 반대편으로 나가는 것을 볼 수 있다. UIS에서 나오는 유량은 해석영역의 출구인 4개의 IHX 입구로 빠져나간다.

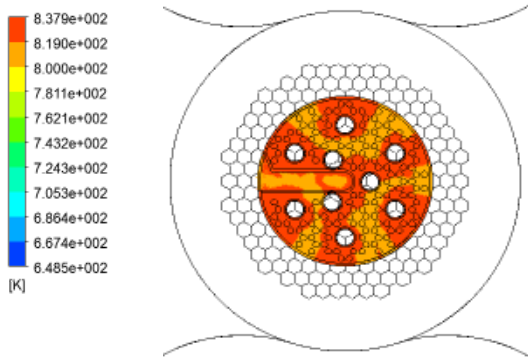


Fig. 8 Temperature contour at the first grid plate

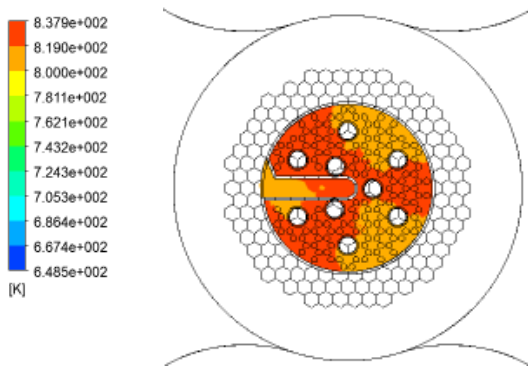


Fig. 9 Temperature contour at the second grid plate

노심출구에서의 온도분포는 Fig. 6에 나타내었으며, 여기서는 각 노심출구에서의 온도차이가 명확하게 보인다. 유입된 유량이 위 방향으로 흐르면서 뒤섞이지만 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 완전히 뒤섞이지는 않는다. 노심출구 중심에 가까운 부분은 일정한 온도 차이를 유지하고 있으며, 그 바깥쪽 부분도 중심보다 낮지만 일정한 온도 차이를 보인다. 이와 마찬가지로 UIS의 하단에서의 첫 번째 판과 두 번째 판에서의 온도 분포를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 노심출구 중심에 가까운 부분의 온도 차이는 UIS의 첫 번째 판과 두 번째 판까지 이어지는 것을 확인 할 수 있다.

3.2 관찰지점 설정

온도요동을 관찰하기 위해서는 어느 한 지점에서 시간에 따른 온도변화를 알아야 한다. UIS에 도달하는 유체의 혼합이 완전히 이루어지지 않는다면 온도요동이 발생할 수 있으므로 Fig. 10에 보여 지는 바와 같이 UIS의 첫 번째 판(아래)과 두 번째 판(위)에도 관찰 지점을 설정 하였다. 여기서는 UIS의 측면의 ㄱ자 형태의 홈으로 빠져나오는 유량을 고려하였다. 그

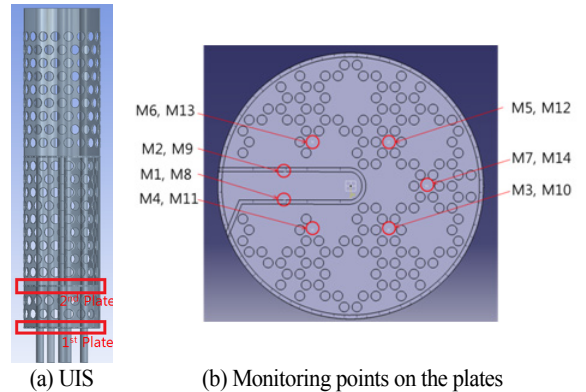


Fig. 10 Monitoring points and its positions (M1 to M7: Second Grid Plate, M8 to M14: First Grid Plate)

리고 해석영역의 출구가 되는 IHX의 입구와 그 상부에도 관찰지점을 설정하여 온도요동을 관찰할 수 있도록 하였다.

3.3 온도요동

앞서 언급하였듯이 thermal striping의 주요 인자는 온도요동의 주기 및 진폭이다. 이를 위해 설정한 관찰지점으로부터 얻은 시간에 따른 온도요동을 Fig. 11-18에 나타내었다. 이들 그림들에서 UIS의 첫 번째 판에서 온도요동의 진폭이 가장 크고, UIS의 두 번째 판에서 온도요동이 적어짐이 관찰된다. Fig. 13과 Fig. 16은 첫 번째 및 두 번째 판들 중에서는 ㄱ-형태의 출구에서 온도요동의 진폭이 가장 크다. 즉, 이 지역이 thermal striping에 가장 취약한 지역이고 열혼합이 가장 크게 일어남을 알 수 있다. IHX 입구와 벽에서의 온도요동은 매우 작다. 이것은 이들 지점들에서는 thermal striping이 일어나지 않음을 보여준다. 일반적으로 thermal striping이 일어나는 이유는 제어봉집합체와 핵연료집합체와의 온도차에 기인한다. 그러므로 제어봉집합체의 출구온도와 유량이 thermal striping 현상의 가장 큰 변수이다. 위에서 관찰된 바와 같이 PGSFR 설계에서는 첫 번째 판의 ㄱ-형태 출구에서 thermal striping이 최대로 일어나며, 이곳에서의 온도요동의 최대진폭과 주기를 입력하여 구조해석을 수행하면 원자로 가동 동안 기기의 구조적 건전성을 추정할 수 있다.

3.4 온도요동 주기

Fig. 19-24는 Fig. 11-16 지점들에서 계산된 온도요동의 주기를 보여준다. 일반적으로 온도요동이 심하지 않으면 1-2개의 어떤 특정한 값으로 주기가 주어지나, 열혼합이 심하게 일어나는 지역에서는(Fig. 21, Fig. 24) 몇 개의 주기들이 공존함을 보여준다. 일반적으로 고속로 노심상부에서의 온도요동의 주기는 일반적으로 0-50 Hz 정도이고, 주기가 10 Hz 정도 보다

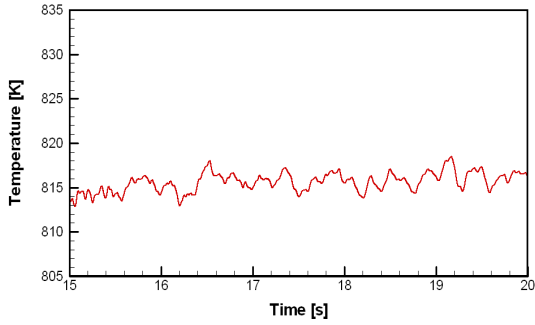


Fig. 11 Temporal variation of temperature at the first grid plate of the UIS (location: M12)

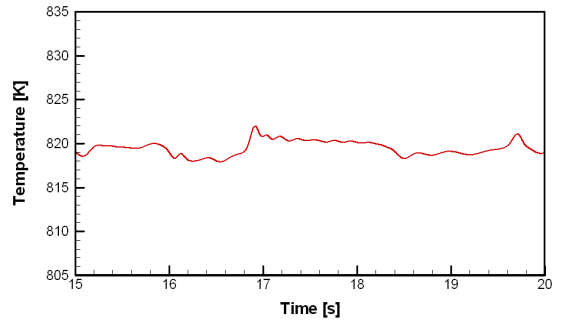


Fig. 15 Temporal variation of temperature at the second grid plate of the UIS (location: M6)

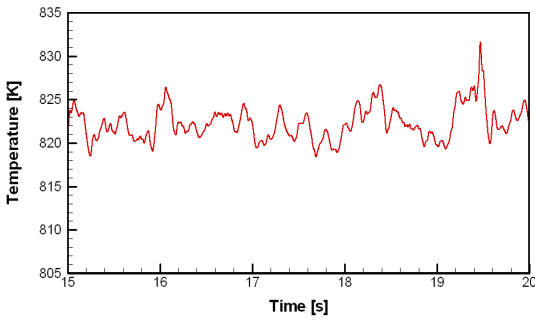


Fig. 12 Temporal variation of temperature at the first grid plate of the UIS (location: M13)

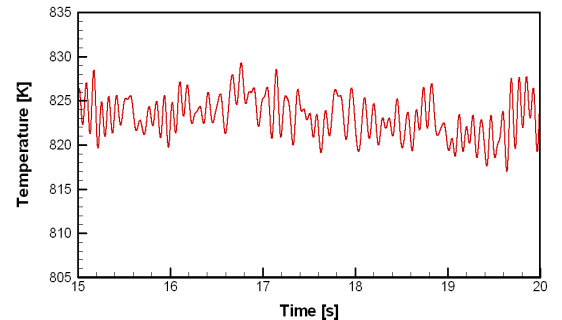


Fig. 16 Temporal variation of temperature at the second grid plate of the UIS (location: M2)

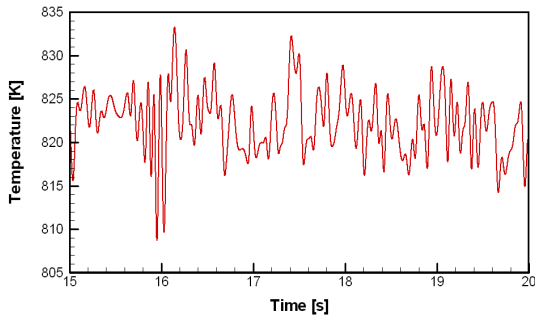


Fig. 13 Temporal variation of temperature at the first grid plate of the UIS (location: M9)

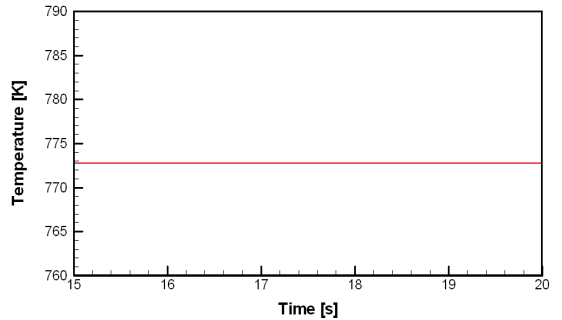


Fig. 17 Temporal variation of temperature at the IHX surface

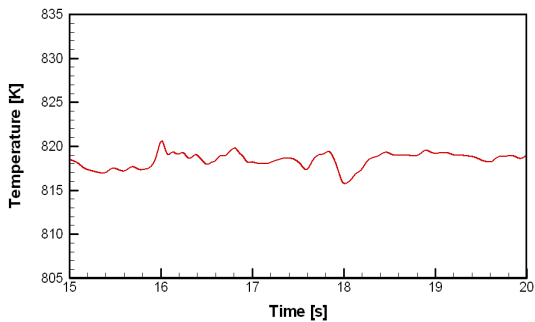


Fig. 14 Temporal variation of temperature at the second grid plate of the UIS (location: M5)

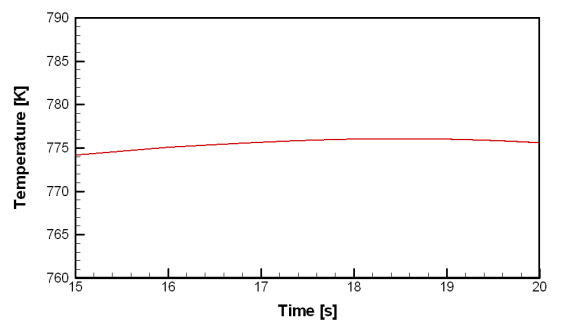


Fig. 18 Temporal variation of temperature at the IHX inlet

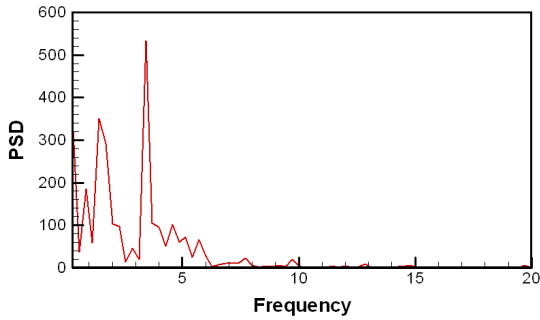


Fig. 19 PSD diagram at the first grid plate of the UIS (location: M12)

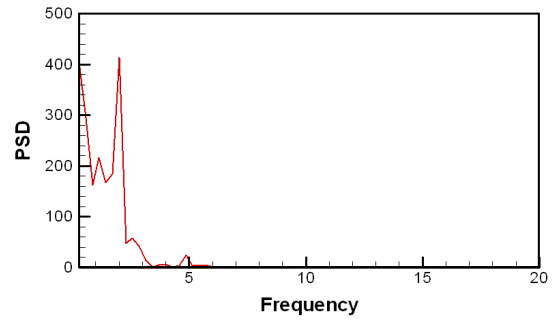


Fig. 22 PSD diagram at the second grid plate of the UIS (location: M5)

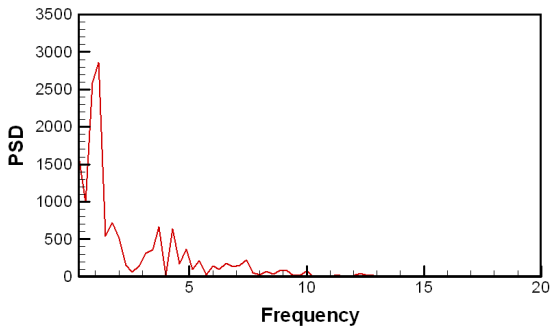


Fig. 20 PSD diagram at the first grid plate of the UIS (location: M13)

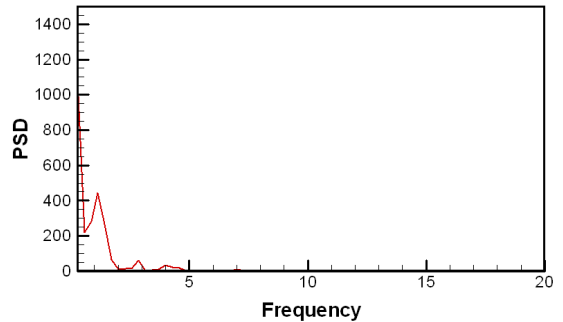


Fig. 23 PSD diagram at the second grid plate of the UIS (location: M6)

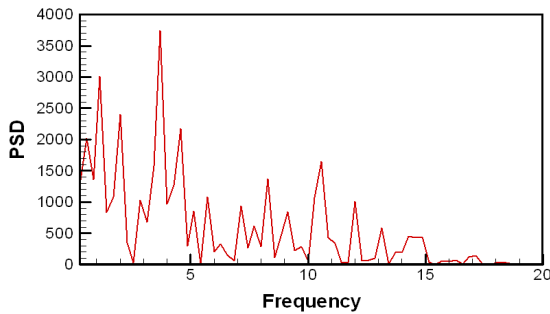


Fig. 21 PSD diagram at the first grid plate of the UIS (location: M9)

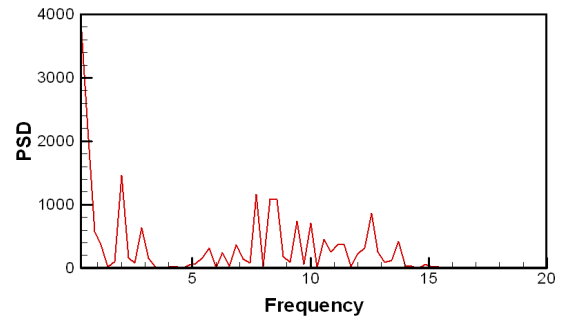


Fig. 24 PSD diagram at the second grid plate of the UIS (location: M2)

적으면 심각한 문제가 발생한다고 보고되어 있다. 온도요동의 주기가 비교적 작은 경우에는 인접한 구조물에 전달될 수 있는 충분한 시간이 제공되므로 이러한 저 주기의 온도변화 특성이 그 크기, 즉 진폭이 큰 지점에서는 구조물의 온도변화를 현저하게 일으킬 수 있다고 알려져 있다. 그러므로 주기가 큰 온도요동은 thermal striping 관점에서는 크게 문제가 되지 않는다. Fig. 19-24의 그림들에서 관찰할 수 있는 바와 같이 모든 영역에서 온도요동의 주기가 15 Hz 보다 적다. 그러므로 온도요동의 진폭이 큰 지점에서는 고체물에 심각한 열피로

현상을 일으킬 수 있음을 보여준다. 위의 결과를 바탕으로 구조해석을 수행하면 노심상부 구조물이 원자로 가동수명 내에 열피로를 견딜 수 있는지 파악할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 150 MWe급 소듐 냉각 고속로에서 상부플레넘의 고온폭을 해석대상으로 LES해석을 수행하여 온도요동의 진폭 및 진동수에 대한 연구를 하였다. 이 해석의 결과로

해석영역 전체에 대한 유동장 및 온도장을 분석하였으며, 관찰지점을 설정하여 각 지점에서의 온도요동을 확인할 수 있었다. 여기서 얻어진 결과로 소뿔 냉각 고속로의 정상운전 중 온도요동이 심하여 열피로 현상에 대해 고려해야 하는 고체 구조물의 위치를 파악할 수 있었다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government MSIP. (No. 2012M2A8A2025624).

References

- [1] 2004, Nam, H.Y. and Kim, J.M., "Thermal Striping Experimental Data," *Internal Report KAERI*, LMR/IOC-ST-002-04-Rev.0/04.
- [2] 2007, Choi, S.K. and Kim, S.O., "Evaluation of Turbulence Models for Thermal Striping in a Triple Jet," *Transactions of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, 129(4), pp.583-592.
- [3] 1988, Chen, H.C. and Patel, V.C., "Near-wall Turbulence Models for Complex Flows Including Separation," *AIAA Journal*, 26, pp.641-648.
- [4] 1994, Menter, F.R., "Two Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, 32, pp.1598-1604.
- [5] 2002, Medic, G. and Durbin, P.A., "Toward Improved Prediction of Heat Transfer on Turbine Blades," *Transactions of ASME, Journal of Turbomachinery*, 124, pp.187-192.
- [6] 2011, Chacko, S., Chung, Y.M., Choi, S.K., Nam, H.Y. and Jeong, H.Y., "Large-Eddy Simulation of Thermal Striping in Unsteady Non-isothermal Triple Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, pp.4400-4409.
- [7] 1995, Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., "A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," *Computer and Fluids*, 24(3), pp.227-238.