2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Thermal Stripping이 있는 비정상 난류유동장에 대한 LES 적용에 관한 예비연구

A Preliminary Study of Large-Eddy Simulation on Transient Turbulent Flows with Thermal Stripping

한진우, 유근종

창원대학교
경상남도 창원시 사림동 9번지

김성오

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동150

요 약

Thermal Stripping 현상을 유발할 수 있는 비정상 난류유동장을 LES 기법을 이용하여 해석하였다. LES 기법은 Sub-Grid k 모델을 이용하여 구성하였다. 구성된 LES 기법은 물을 분사하는 제트에 수직인 방향으로 평판이 있는 유동장과 액체 나트륨을 분사하는 제트에 수평인 방향으로 평판이 있는 유동장에 대한 해석에 적용되었다. 해석결과는 비정상 난류유동장에서 Thermal Stripping 현상을 분석하기 위하여 필요한 온도요동성분의 진폭과 주파수 등 시간에 따른 유동변수의 변화를 제시할 수 있음을 확인하였다. 그러나 LES에 의한 해석결과의 신뢰성을 제고하기 위해서는 다양한 아격자 모델의 평가와 온도장에 대한 아격자 모델의 개발이 요구되고 있다.

Abstract

LES is applied to analyze transient turbulent flows which may cause thermal stripping. The LES is formulated based on Sub-Grid k model. For evaluating performance of the LES, two test cases of vertical water jet flow and parallel sodium jet flow are selected. Through the analysis, the LES confirms that it has proper ability to predict time dependent flow variables such as magnitude of temperature fluctuation and its frequency. For the better prediction, however, the LES is required to be improved through further evaluation of various SGS models and implementation of temperature SGS model into its energy equation.

1. 서 론

Thermal Stripping은 고온과 저온의 온도변화가 현저하여 발생하는 온도요동특성으로 인하여 구조물의 불규칙한 온도요동특성을 유발함으로서 발생되는 열피로 현상을 말한다. 이러한 현상은 고온과 저온의 냉각재가 활발히 혼합되는 액체금속로를 비롯한 원자로 내부에서 발생할 가능성이

있는 것으로 알려져 있다. 액체금속로는 노심출구 근처에 열적 특성이 다른 여러가지 노심구성요소가 배치되어 있고 연료집합체와 제어봉집합체 등을 통과한 냉각재는 상당한 온도차를 가지고 있으므로 냉각재의 혼합과정에서 불규칙한 온도변화를 보이고 있다. 이렇게 불규칙한 온도 변화를 보이는 냉각재가 노심출구 근처의 다양한 노내 구조물을 통과하면 냉각재의 불규칙한 온도변화가 구조물 내부로 전파되어 구조물 내부의 불규칙한 온도요동을 형성하며 이로 인한 열피로를 일으키는 Thermal Stripping 현상이 발생할 수 있다. 특히 액체금속로에서는 열전도율이 큰 액체나트륨을 냉각재로 사용하므로 이러한 현상을 가속화할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 이러한 현상을 올바르게 분석하는 것은 Thermal Stripping 현상을 미연에 방지하여 가능한 열피로의 발생을 차단할 수 있는 설계를 수행하는 선결요건이 된다.

Thermal Stripping 현상의 분석을 위하여 시도된 실험은 일본을 중심으로 다양한 연구[1~4]가 진행되었다. 이들의 연구에서는 Thermal Stripping이 발생할 가능성이 높은 영역의 유동이 제트유동 혹은 합류배관 유동 등임에 주목하여 실험 연구의 대상을 설정하였다. 또한, 액체금속로의 냉각재가 액체나트륨이므로 동일한 유체를 사용하는 대형 실험장치를 제작하였다. 이들은 물을 사용하는 실험과 함께 이들 실험을 통하여 다양한 실험자료를 취득하여 분석을 할 수 있었으나 실험시간과 비용을 감안할 때 Thermal Stripping에 영향을 미치는 여러 가지의 영향요소들에 대한 효과적인 실험의 수행은 제한이 있을 수 밖에 없었다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 분석방법으로 수치해석에 의한 방법이 제시되었는데 Thermal Stripping이 발생하는 유동장의 특성을 고려할 때 난류특성의 정확한 반영과 함께 각 유동변수에 대한 시간의 함수가 올바로 예측될 수 있는 성능이 요구되고 있다. 이를 위하여 일본을 비롯하여 영국 및 프랑스[5,6] 등에서는 꾸준한 연구가 진행되었다. 그러나 대부분의 연구는 난류모델을 기본으로 하여 해석을 시도하므로서 전체적인 난류유동장의 특성을 예측하는데는 주목할 만한 성과를 제시할 수 있었으나 특정 온도요동성분에 의한 영향력의 중요성을 도출하는데는 한계를 노출하고 있다. 즉, Thermal Stripping 현상은 유동장의 불규칙 온도요동성분이 주파수의 변화에 따라 구조물로의 전파 능력이 다르므로 이로 인한 영향을 크게 받게 되는데 난류모델은 온도의 요동성분을 이미 시간 평균한 후 분석을 하고 있어 이와 같은 특성을 도출해 내기가 어려운 한계가 있는 것이다. 일본의 Muramatsu[1,2,7~11]는 난류모델에 의한 해석결과로는 온도요동성분의 진폭을 제시할 수 있으나 주파수를 비롯한 상세 시간정보는 DNS(Direct Numerical Simulation)를 통하여 구해야 한다는 점을 강조하고 이의 해석 방법론을 제시하였다. 그의 해석방법론에서는 난류모델을 사용하여 전체 유동장을 해석하고 그 중에서 Thermal Sripping이 발생할 가능성이 높은 영역을 선별하여 이 부분에만 DNS를 적용하여 시간에 따른 상세 온도 변화정보를 도출하여 구조물의 열전달 해석을 위한 입력조건으로 연계하여 활용하는 방법이다. 이러한 방법론은 DNS의 높은 신뢰성을 감안할 때 매우 진보된 해석방법론으로 평가할 수 있다. 그러나 DNS를 일부 영역에만 적용하는 것은 계산의 비용절감을 위한 필요성 때문이고 이에 따라 선별된 일부 영역에 대한 경계조건의 설정이 매우 모호한 문제점으로 남는다는 현실적 제약성을 고려할 때 이 해석방법론의 적용에는 한계가 있다는 점을 알 수 있다.

이에 비하여 LES(Large-Eddy Simulation)는 일정 격자 크기 이하에서만 난류모델링기법을 적용하고 대부분의 격자에 대해서는 직접해석을 하므로서 난류변수의 시간에 따른 정보를 얻을 수 있는 특징이 있는 기법이다. LES에서는 작은 크기 척도에서만 난류모델을 적용하므로서 DNS에 비하여 훨씬 적은 격자수를 가지고 빠른 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. LES는 작은 크기 척도에 대한 난류모델링의 적용으로 전체적인 해석결과의 정확도를 감소시킬 수 있는 가능성이 있으나 계산비용의 절감 특성과 DNS에서의 경계조건의 모호함을 함께 고려한다면 실제적인 문제에 적용할 수 있는 타당성이 있다. 본 연구에서는 이 LES 기법을 Thermal Stripping 현상이 발생할 가능성이 있는 유동장의 하나인 제트유동에 적용하여 온도변화의 특성을 분석하고자 한다.

2. 지배방정식과 수치해석

LES는 전장에서 기술한 바와 같이 기초방정식을 공간적으로 평균화하고, 유동장을 격자로 해석할 수 있는 성분과 그 이하의 작은 성분으로 분리하여 전자는 직접 계산하고 후자는 모델화하여 해석하는 방법이다. 격자가 충분하게 작은 것이라면 격자 이하의 난류구조는 등방적이라고 간주할 수 있어 보편적인 모델을 구성하기 쉬운 특징을 갖고 있다. 또한 일반적인 난류모델은 난류에 의한 변동량을 시간평균할 것을 제안하고 있는 것에 반해 LES에서는 시간평균을 이용하지 않기 때문에 시간변동이 빠른 비정상 유동에의 응용이 가능하다.

격자로 해석되지 않는 작은 스케일의 와동에 대해서 아격자 모델을 도입한다. 기초방정식에 가우시안 필터 등의 공간적인 평균화 조작을 행하면, SGS(Sub-Grid Scale)항으로 레이놀즈항, 교차항 및 레오나드항이 나타나서, 각각에 대해서 모델화가 필요하다.

LES에서 아격자 유동장의 $\bar{u}_i$는 필터링이 수행된 연속방정식과 Navier-Stokes방정식을 풀어 얻어진다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{r\,\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(r\,\overline{\bar{u}_i\,\bar{u}_j}\right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial\, r\, t_{ij}}{\partial x_j} + m\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j\, x_i} \tag{2}$$

여기서, r 는 밀도, t 는 시간, $\bar{u}_i$ 는 필터링이 수행된 속도, x_j 는 직교좌표, $\bar{P}$ 는 필터링이 수행된 압력, t_{ij} 는 SGS 레이놀즈 응력이고 m 는 점성계수이다.

아격자 모델의 레이놀즈 응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t_{ij} &= \left(\overline{\bar{u}_i\,\bar{u}_j} - \bar{u}_i\,\bar{u}_j\right) + \left(\overline{\bar{u}_i\,\bar{u}'_j} + \overline{\bar{u}_j\,\bar{u}'_i}\right) + \overline{u'_i\,u'_j} \\ &= L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, L_{ij} 는 레오나드항, C_{ij} 는 교차항, R_{ij} 은 레이놀즈항이다.

물리적 공간에서 정의되는 대부분의 아격자 모델은 에너지의 구배-수송 가정(Gradient-Transport Approximation)을 기초로 하는 에디-점도를 이용하여 SGS 레이놀즈 응력 t_{ij} 와 큰 에디에서의 변형율 s_{ij} 와의 관계를 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} t_{ij} &= -2n_t \cdot s_{ij} + \frac{2}{3}\,k\,d_{ij} \\ &= -n_t\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) + \frac{2}{3}k\,d_{ij} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, n_t 는 와점성 계수이다.

SGS 난류운동에너지, k를 구하기 위해서 Smagorinsky모델을 개선한 Sub-Grid k모델[12]을 사용하였다.

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\tilde{u}_j k-\frac{n_t}{d_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)=v_t\cdot P-e \tag{5}$$

여기서,

$$\begin{aligned}P &\equiv 2\, s_{ij}\,\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\\ &=\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right)\cdot\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\end{aligned} \tag{6}$$

이며 소산항은 다음과 같이 정의된다.

$$e=c_e\,\frac{k^{3/2}}{D} \tag{7}$$

또한, 난류 점성항은 다음과 같이 정의된다.

$$n_t=c_k\, D\sqrt{k} \tag{8}$$

여기서,

$$c_k=0.05 \tag{9}$$

$$c_e=1 \tag{10}$$

$$D=\sqrt[3]{V} \tag{11}$$

V는 격자의 부피이다.

에너지 보존식을 대표하는 엔틸피방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(r\, h_t\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(r\tilde{u}_j h_t-k\frac{\partial T}{\partial x_j}+\overline{r}\,\overline{u'_j\, h'_t}\right)=\frac{\partial p}{\partial t}+\tilde{u}_j\frac{\partial p}{\partial x_j}+t_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{12}$$

여기서,

$$h_t = \bar{c}_p T - c_p^0 T_0 \tag{13}$$

$$\bar{r}\,\overline{u_j' h_t'} = -\frac{m_t}{s_{h_t,t}} \frac{\partial h_t}{\partial x_j} \tag{14}$$

온도분포는 엔탈피로부터 도출한다. 본 연구에서 수행한 LES 기법은 현재 운동량 방정식에만 적용되어 있으며 에너지 방정식에는 레이놀즈의 상사성과 (14)식에 보인 바와 같은 난류 Pr수를 이용하여 연계하므로서 적용하였다.

본 연구에서는 상용코드인 STAR-CD(13)를 사용하여 분석을 수행하였다. 수치해석을 위하여 대류항과 확산항의 이산화법은 MARS(Monotone Advection and Reconstruction Scheme)를 사용하였다. 이 이산화법은 TVD(Total Variation Diminishing) 이산화법이며 2차 정확도를 가지고 있다. 시간에 관한 계산은 2차 정확도를 가지는 CRANK-NICOLSON 이산화법을 사용하였다. 해석 기법은 PISO기법을 사용하여 비정상상태를 해석하였다.

3. 제트의 분사 방향에 수직인 평판이 있는 유동장 (Case 1)

수직 벽에 충돌하는 고온과 저온의 제트류가 있는 유동장을 2차원으로 가정하여 분석하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 유동장은 폭 254mm, 길이 38mm인 공간에서 형성되었다. 해석공간은 Fig. 1에 보인 바와 같으며 계산을 위한 격자는 x방향으로 58개, y방향으로 24개를 사용하였고 이들을 제트출구 주변과 수직 평판 주변에 집중적으로 배치되었다. 노즐의 폭은 고온부와 저온부 각각 5.3mm이고 노즐 출구에서 벽 까지의 높이는 38mm이다. 고온부와 저온부에서 분사되는 물의 온도는 각각 303K와 293K이며 2.554m/s의 동일한 속도로 벽을 향해 분사된다. 벽의 재질은 SUS 304, 두께는 51.7mm, 벽 외면의 온도는 저온 제트의 온도와 같은 293K로 설정하여 열전달

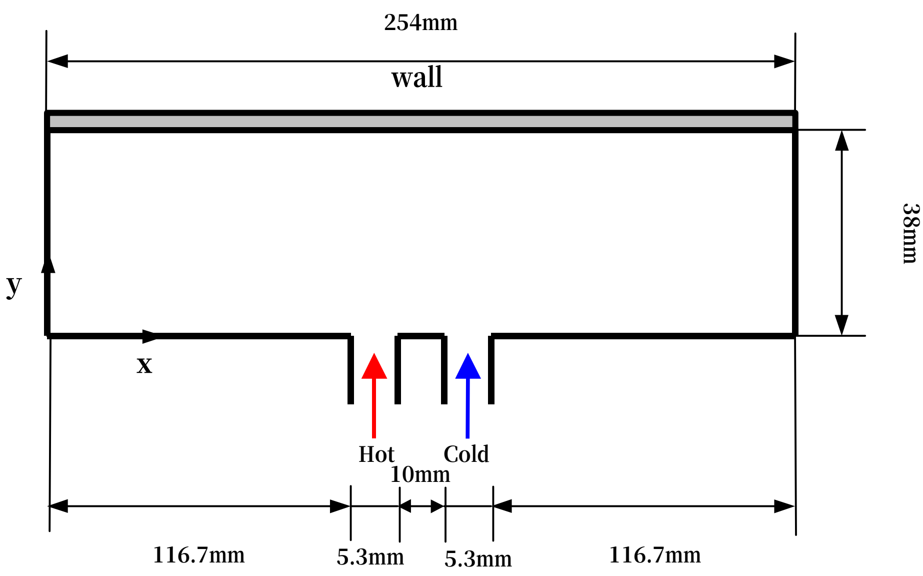
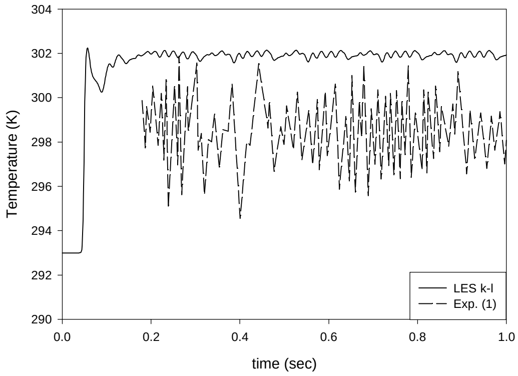


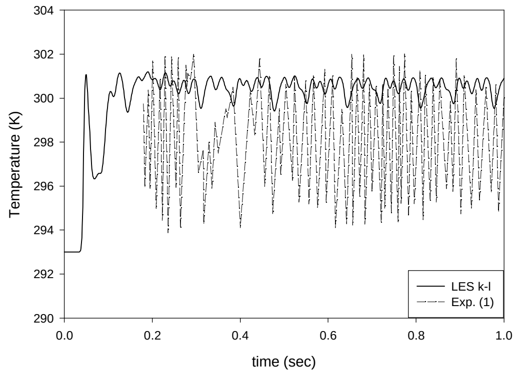
Fig. 1 Geometry of Vertical Jet Flow in Case 1

이 이루어지도록 벽에서의 경계조건을 설정하였다. 입구와 벽 이외의 경계조건은 유체의 유출입이 가능하도록 압력경계조건을 설정하였다. 비정상상태의 해석을 위한 시간증분은 1E-3초로 설정하여 0초에서 1초까지 계산을 수행하여 과도상태에서 정상상태까지를 포함하였다. 수렴조건은 질량의 수렴조건으로 절대오차 1E-4로 하였으며 이 조건에서 계산결과는 운동량 및 에너지 방정식도 수렴조건을 만족하였다.

계산값과 실험값과의 비교지점은 상부 벽면의 정 중앙인 x=127mm인 지점을 Point 3로 하였으며, Point 3에서 x방향으로 –25mm, -12.5mm, 12.5mm, 25mm 떨어진 곳을 각각 Point 1, Point 2, Point 4, 그리고 Point 5로 하였다. 또한 각각의 Point에서 벽으로부터 2mm와 5mm가 떨어진 지점에서 온도를 계산하였으며 2mm 떨어진 곳은 점성경계층 내에 있는 지점이고 5mm 떨어진 곳은 경계층 외부에 있는 지점임을 나타낸다. 여기서는 Point 1, 3, 그리고 5 지점에서 시간에 대한 온도의 변화를 Fig. 2에서 Fig. 4까지 나타내었다.

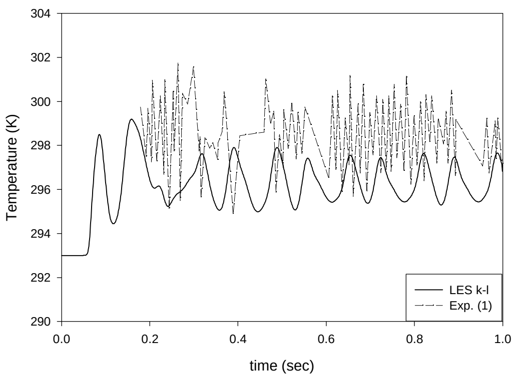


(a) 2mm from The Wall

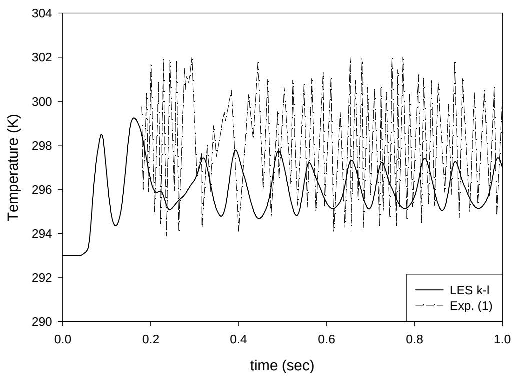


(b) 5mm from The Wall

Fig. 2 Variation of Temperature at Point 1 in Case 1

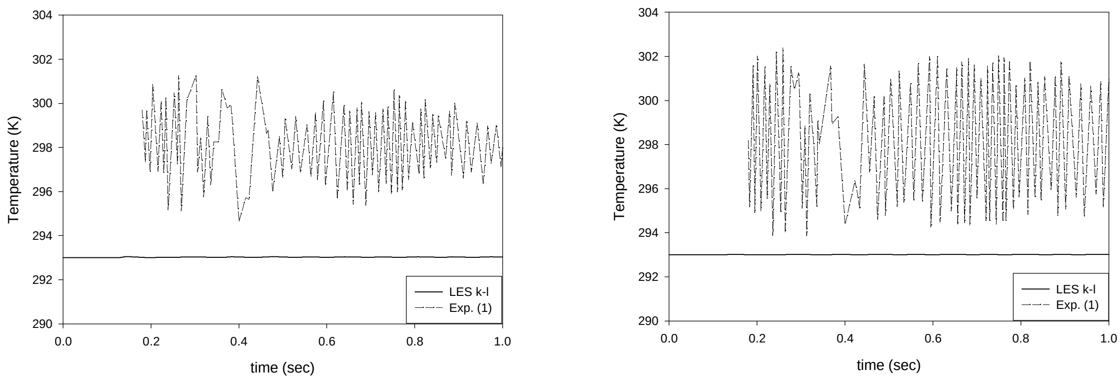


(a) 2mm from The Wall



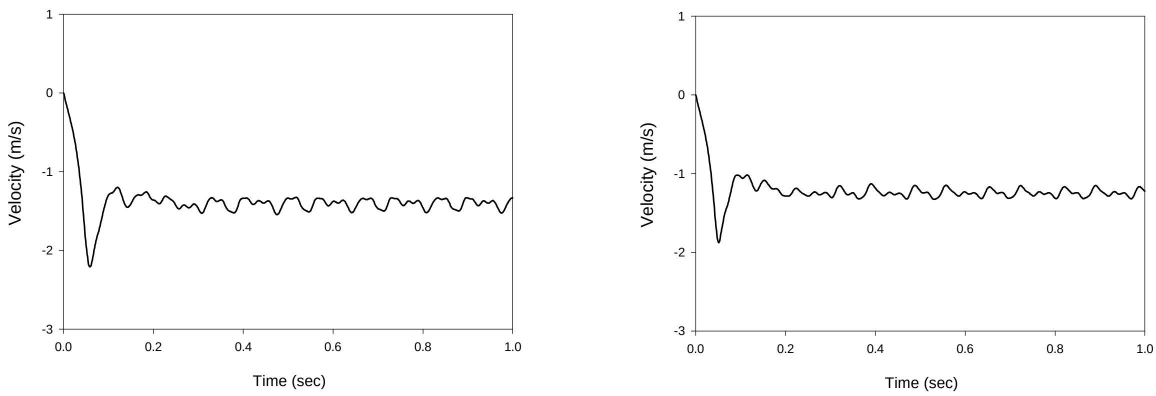
(b) 5mm from The Wall

Fig. 3 Variation of Temperature at Point 3 in Case 1



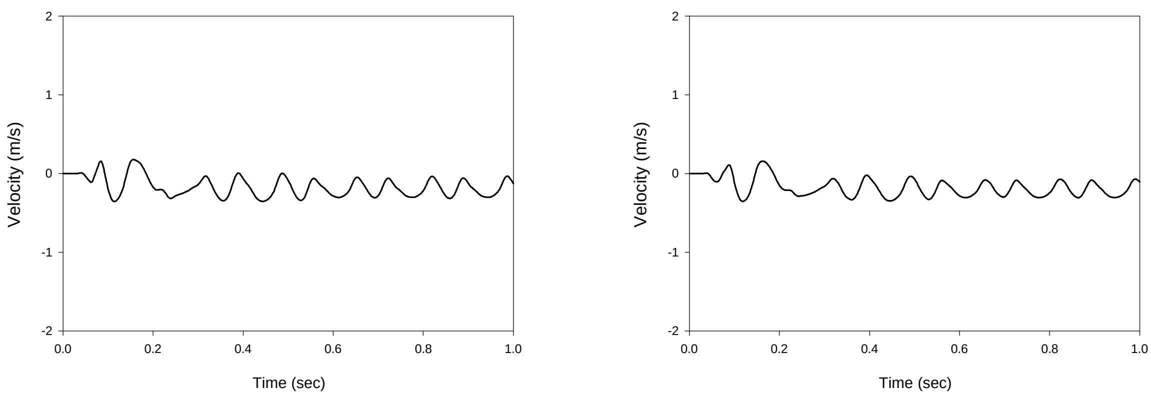
(a) 2mm from The Wall　　(b) 5mm from The Wall

Fig. 4　Variation of Temperature at Point 5 in Case 1



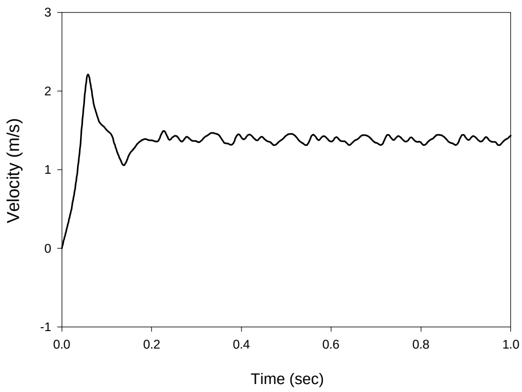
(a) 2mm from The Wall　　(b) 5mm from The Wall

Fig. 5　Variation of U Velocity at Point 1 in Case 1

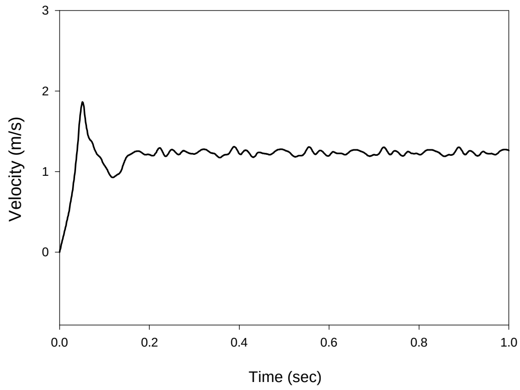


(a) 2mm from The Wall　　(b) 5mm from The Wall

Fig.6　Variation of U Velocity at Point 3 in Case 1



(a) 2mm from The Wall



(b) 5mm from The Wall

Fig. 7 Variation of U Velocity at Point 5 in Case 1

Fig. 2에서 4까지는 각각 고온측 영역과 중앙부 그리고 저온측 영역을 대표하는 지점의 온도변화로서 그 평균온도가 약 301K, 297K, 그리고 293K를 나타내고 있다. 전체적으로 약 0.2초 이후에는 이미 정상상태의 온도변화 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 2에 보인 고온 영역의 벽면에 가까운 경계층 내부에서는 충돌한 제트의 방향 전환에 따른 고온수의 집중화로 높은 평균온도를 보이고 있는 반면 경계층 외부에서는 평균온도는 약간 낮으나 난류영역에 위치하여 큰 온도요동 특성을 보이고 있다. 즉 경계층 내부와 외부에서의 온도변화는 주파수의 변화는 유사하나 온도요동진폭이 난류영역에서 현저하게 증폭되었음을 나타내는 것이다. 같은 지점에서 실험에 의하여 구한 온도변화는 분석 결과에 비하여 온도요동진폭이 크게 나타나는 것으로 보아 실험에서 더 현저하게 고온수의 이동이 이루어졌음을 유추할 수 있다. 상부 벽면의 중앙부를 나타내는 Point 3에서의 온도변화는 Fig. 3에 제시되었는데 평균온도는 Point 1에 비하여 감소하였으나 온도요동진폭이 크게 증가하였음을 보이고 있다. 또한 주파수는 감소하였으나 온도요동진폭이 크다는 것은 고온수와 저온수의 교차 움직임이 활발하다는 것을 나타내는 것이다. 2mm 지점과 5mm 지점의 온도변화특성은 상호 유사하나 5mm 지점에서의 진폭이 2mm 지점에서의 진폭보다 다소 큰 차이를 보이고 있다. 여기서도 실험에서는 큰 온도요동진폭과 주파수를 보이고 있어 고온수와 저온수의 교차 이동이 매우 활발함을 알 수 있다. Fig. 4에서 보인 저온영역에 대한 해석결과는 온도변화의 진폭이 매우 작고 주파수 또한 작아 거의 일정한 온도 분포를 보이고 있는 반면 실험결과는 이 지역에서도 유체의 혼합 효과가 매우 현저하여 큰 온도 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 실험결과에 비하여 분석결과가 전반적으로 유체의 혼합에 의한 온도의 변화 특성을 약하게 반영하고 있는 것으로 이는 노즐에서 분사된 고온수와 저온수의 혼합효과가 약함을 나타내는 것이다. 이러한 결과는 실제 현상이 3-D임에 비하여 해석은 2-D유동을 가정하여 수행하므로서 강력한 혼합효과를 반영하지 못한 것이 주요한 원인으로 지목된다. 이러한 현상은 Fig. 5에서 7까지 제시된 바와 같이 방향성을 갖는 속도 성분의 변화특성을 통해 잘 나타나고 있다. 구체적으로 Table 1에서는 각 지점에서 최대 온도변화진폭을 Maximum Temperature Variance로, 또 온도요동성분의 RMS(Root Mean Square) 값을 구해 제시하였는데 실험결과는 유체의 혼합효과가 매우 커서 전체적으로 거의 유사한 값을 보이고 있는 반면에 해석결과는 중앙부인 Point 3에서만 현저한 값을 가질 뿐 다른 영역에서는 그 크기가 매우 작다. Table 2에서는 각 지점에서 온도변화의 주파수를 구하여 제시하였는데 여기서도 실험결과는 전체 유동장에서 유사한 값을 보이고 해석결과는 주파수의 큰 변화를 보이고 있다. 일반적으로 온도변화진폭이 크면서 주파수가 작으면 고체

면에 그 온도요동효과를 전달할 수 있는 충분한 강도와 시간이 제공되므로 고체면에서 Thermal Stripping이 발생할 수 있는 가능성이 높은 것으로 알려져 있다[14]. 이를 토대로 해석결과를 검토해 보면 중앙부인 Point 3가 Thermal Stripping 발생 가능성에 비교적 높게 노출되고 있음을 유추할 수 있다.

Table 1. Maximum Temperature Variation and Its RMS Value

위 치	벽면으로부터의 거리	Experiment		LES (SGS k)	
		Max. Temp. Var.	RMS	Max. Temp. Var.	RMS
①	2mm	6.250	3.399	0.458	0.279
	5mm	7.938	4.481	1.588	0.951
②	2mm	7.413	3.872	0.037	0.100
	5mm	8.000	4.173	0.045	0.135
③	2mm	6.250	3.310	2.924	1.538
	5mm	8.000	4.265	3.110	1.621
④	2mm	6.263	3.257	0.057	0.033
	5mm	8.313	4.228	0.053	0.031
⑤	2mm	6.150	3.089	0.025	0.015
	5mm	8.388	4.229	0.012	0.008

Table 2. Frequency of Temperature Fluctuation

위 치	Experiment		LES (SGS k)	
	벽면으로부터의 거리		벽면으로부터의 거리	
	2mm	5mm	2mm	5mm
①	51	53	42.4	35.8
②	51	53	44.4	35.7
③	51	53	12.0	12.0
④	50	54	19.7	24.2
⑤	51	54	17.5	20.9

4. 제트의 분사방향에 수평인 평판이 있는 유동장 (Case 2)

액체나트륨 제트와 수평한 평판이 있는 유동장을 3차원으로 해석하였다. Fig. 8에 보인 바와 같이 유동장은 폭 250mm, 길이 35mm, 높이 60mm인 공간에서 형성되었다. 해석공간은 Fig. 8과 같으며 격자는 x 방향으로 70개, y 방향으로 35개, z 방향으로 30개를 사용하여 노즐주변과 수직벽 근처에 집중적으로 배치하였다. 노즐의 폭은 고온부와 저온부 각각 5mm이고 길이는 9mm인 사각이며 노즐 출구에서 벽 까지 높이는 35mm이다. 고온부와 저온부에 분사되는 액체나트륨의 온도는 593K와 553K이며 1m/s의 동일한 속도로 벽을 따라 분사된다. 벽의 재질은 SUS 304, 두께는 Wall 1이 15mm, Wall 2는 10mm이다. 벽 외면의 온도는 553K로 하여 열전달이 이루어지도록 벽에서의 경계조건을 설정하였다. Wall 3는 553K를 유지하도록 설정하였다. 입구와 벽 이외의 경계조건은 압력경계조건을 설정하였다. 비정상상태의 해석을 위한 시간 증분은 1E-4초로 설정하여 0초에서 0.5초까지 계산을 수행하였다. 수렴조건은 질량의 수렴조건으로 절대오차 1E-4로 하였으며 이 조건에서 계산결과는 운동량 및 에너지 방정식도 수렴조건을 만족하였다.

계산값과 실험값과의 비교지점은 Wall 2에 위치되어 있는데 그 상세 위치는 Table 3과 같다. Ch. 3, 7, 10 그리고 11에서 시간에 따른 온도의 변화를 Fig. 9에서 나타내었다. Fig. 9에서 보인 온도 변화의 특징은 과도상태의 영향이 매우 크다는 것이다. 전절의 수직평판에 비하여 실험결과의 온도요동진폭이 매우 작은데 비하여 해석 결과는 전 영역에서 큰 온도요동진폭 뿐만 아니라 주파수 또한 큰 특징을 보이고 있다. 이는 현재의 해석이 3차원으로 이루어져 유동장내의 Vorticity의 역할이 제대로 반영되고 이것이 전 유동장의 혼합효과를 크게 증폭시켰기 때문으로 분석된다. 이러한 현상은 Fig. 10에 보인 바와 같이 속도의 변화특성이 0을 중심으로 요동하고 있어 유체의 흐름 방향이 활발하게 교차되고 있음을 보아 확인할 수 있다. 다만 과도상태의 특징이 실험에 비하여 현저히 강조된 것은 실험결과는 이미 정상상태에 도달한 측정값이나 해석결과는 아직 완전한 정상상태에 도달하지 않은 것으로 이해되며 해석에 필요한 시간을 충분히 증가시킬 경우에는 그 결과값이 정상상태의 안정화된 변화 특성을 보일 것으로 판단된다.

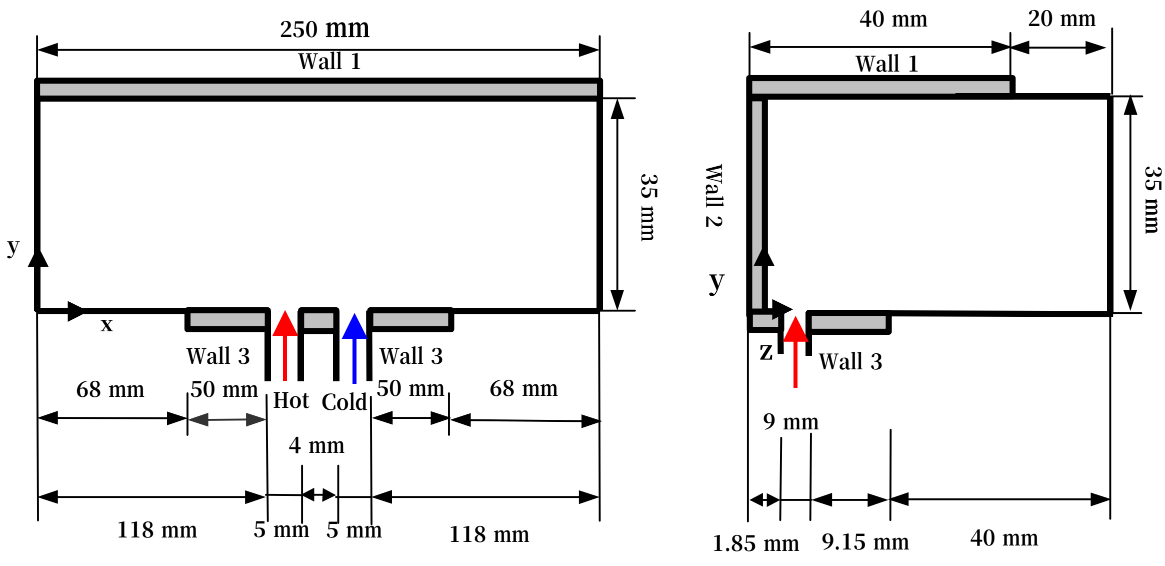
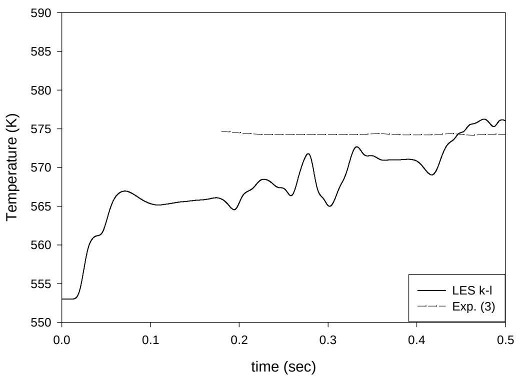


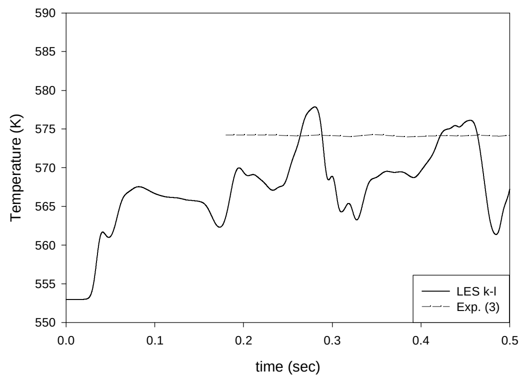
Fig. 8 Geometry of Parallel Jet Flow in Case 2

Table 3. Location of Data Comparison Point

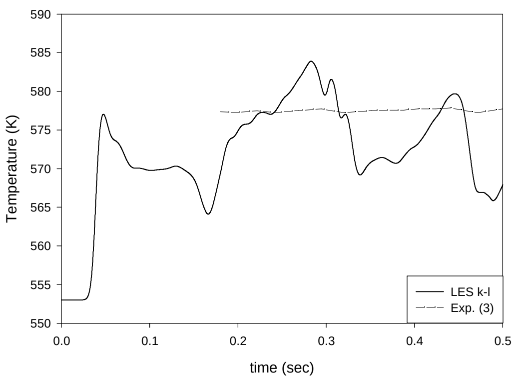
종 류	위 치	x	y	z
벽 표면	Channel 3	125 mm	7.6 mm	0 mm
	Channel 7	125 mm	12.8 mm	0 mm
점성 경계층 영역	Channel 11	126.5 mm	15.4 mm	0.3 mm
점성 경계층 외부	Channel 10	123.5 mm	15.4 mm	1.5 mm



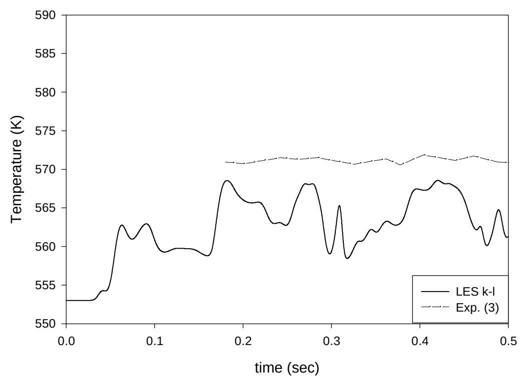
(a) Ch. 3



(b) Ch. 7

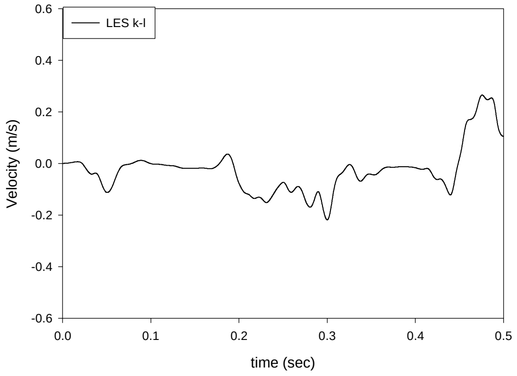


(c) Ch. 10

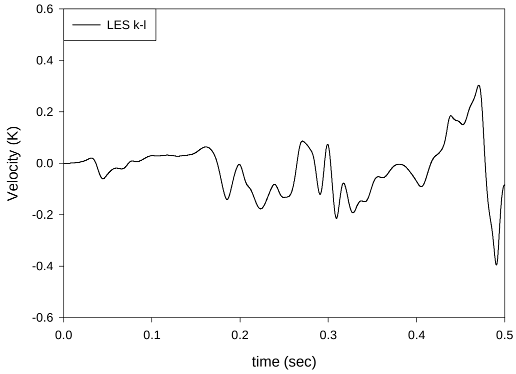


(d) Ch. 11

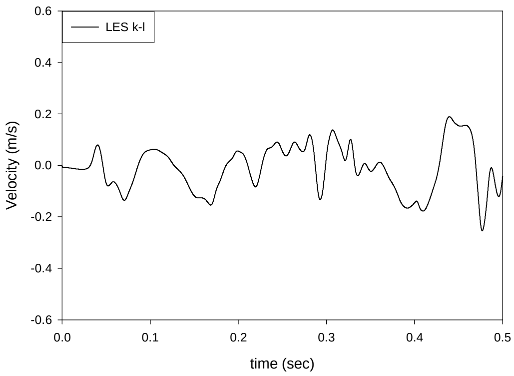
Fig. 9 Temperature Variation of Parallel Jet Flow in Case 2



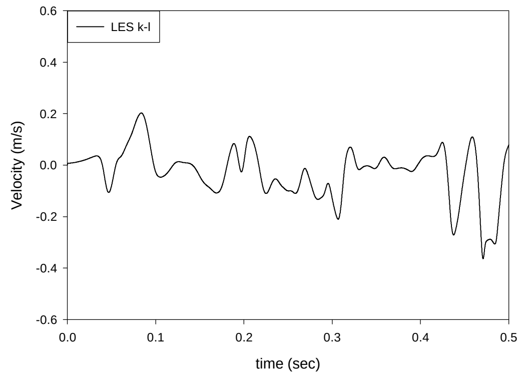
(a) Ch. 3



(b) Ch. 7



(c) Ch. 10



(d) Ch. 11

Fig. 10 U Velocity Variation of Parallel Jet Flow in Case 2

5. 결론 및 향후과제

Thermal Stripping을 수반하는 비정상 난류유동장에 LES 기법을 적용하여 해석을 수행하였다. LES 기법은 속도장과 온도장에서 온도요동진폭과 그 변화 주파수를 도출할 수 있는 해석결과를 제시하였으며 시험결과와 비교하여 유동특성을 제대로 반영할 수 있는 특징이 있음을 확인하였다. 그러나 2차원 해석을 수행한 수직 제트유동이 있는 유동장의 경우에는 온도요동진폭과 주파수가 실험결과에 비하여 작게 예측되어 유동장내의 혼합효과가 저 평가된 것으로 판단된다. 3차원 해석을 수행한 수평제트 유동이 있는 유동장의 경우에는 과도효과와 강한 혼합효과의 반영으로 온도요동진폭과 주파수가 시험결과에 비하여 크게 예측되는 경향을 보았다. 따라서 Thermal Stripping 현상의 분석에서 요구되는 온도요동진폭과 주파수의 올바른 예측을 위해서는 정상상태까지 포함할 수 있는 충분한 시간영역에서 3차원 해석을 수행하는 것이 요구된다. 아울러 신뢰성 있는 LES의 적용을 위하여 다양한 SGS모델에 대한 평가와 함께 온도장에 대한 LES의 확대 적용이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2000년 원자력연구개발사업 중 액체금속로 설계기술개발분야의 유체 및 계측제어계통설계 기술개발과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(IV)", PNC ZN9410 92-105, Apr. (1992)

(2) Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(XII)", PNC TN9410 98-013, Mar. (1998)

(3) Yamagata, M., Ozawa, K. and Tokoi, H., "Thermal Response Experiments for a Fluid and Structure Interaction System Due to Thermal Striping in Sodium", PNC TJ9124 98-007, Oct. (1998)

(4) Yamagata, M., Ozawa, K., Tokoi, H. and Morita, H., "Frequency Response Experiments for a Fluid and Structure Interaction System Due to Thermal Striping in Sodium", JNC TJ9440 99-016, Mar. (1999)

(5) Azarian, M., Astegiano, M., Tenchine, M., Lacroix, M. and Vidard, M., "Sodium Thermal-Hydraulics in the Pool LMFBR Primary Vessel", Nuc. Eng. and Design, Vol. 124, pp.417-430 (1990)

(6) Francois, G., Azarian, G., Astegio, J., Lacroix, C. and Poet, G., "Assessment of Thermal-Hydraulic Characteristics of The Primary Circuit", Muc. Sci. and Eg., Vol. 106, 55-63 (1990)

(7) Muramatsu, T., "Investigation of Sodium Temperature Fluctuation Characteristics Related to Thermal Striping Phenomena Using the DINUS-3 Code", PVP-Vol. 270, Transient Thermal Hydraulics, Heat Transfer, Fluid-Structure Interaction, and Structural Dynamics, ASME (1994)

(8) Muramatsu, T. and Ninokata, H., "Investigation of Turbulence Modelling in Thermal Stratification Analysis", Nuc. Eng. and Design, Vol. 150, pp.81-93 (1994)

(9) Muramatsu, T. and Ninokata, H., "Development of Thermohydraulics Computer Programs for Thermal Striping Phenomena", Nuc. Tech. Vol. 113, pp.54-72 (1996)

(10) Muramatsu, T., "IAEA Coordinated Research Program on "Harmonization and Validation of Fast Reactor Thermomechanical and Thermohydraulic Codes Using Experimental Data(I)", PNC TN9410 97-058, Jun. (1997)

(11) Muramatsu, T., "Numerical Analysis of Nonstationary Thermal Response Characteristics for a Fluid-Structure Interaction System", Trans. ASME, J. pressure Vessel Tech., Vol. 121, pp.276-282 (1999)

(12) Fureby, C., Tabor, G., Weller, H. G. and Gosman, A. D., "A Comparative Study of Subgrid Scale Models in Homogenous Isotropic Turbulence", Physics of Fluids, 9, pp. 1416~1429, (1997)

(13) STAR-CD Ver. 3.10A, Computational Dynamic Limited, (1999)

(14) Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(XIII)", JNC TN9400 99-007, Jan. (1999)