2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

온도변화가 있는 비정상 난류유동장 해석을 위한 난류모델의 성능비교에 관한 연구

A Study on Analysis Performances of Turbulence Models for Unsteady Turbulent Flow with Temperature Variation

전원대, 유근종

창원대학교
창원시 사림동9번지

심윤섭

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

온도변화가 있는 비정상 난류유동장을 해석하기 위하여 $k-e$ 모델, 수정 $k-e$ 모델, 그리고 Full Reynolds Stress(FRS)모델을 적용하였다. 검증대상은 물과 액체나트륨을 사용하는 수직평판과 수평평판에 대한 제트유동이 있는 유동장을 선정하였다. 유동특성의 예측 능력을 검증하기 위하여 각 경우에 대하여 2-D 및 3-D 해석을 수행하고 유동의 혼합특성과 온도 변화 특성을 분석하였다. 분석결과 비정상 난류유동장은 FRS를 사용하여 3-D로 해석하는 것이 가장 나은 결과를 제시하였다. 그러나 유체와 경계면에서의 열전달 특성의 분석에서 정확성을 재고하기 위해서는 이를 위한 수정모델의 도입이 요구된다.

Abstract

In analysis of unsteady turbulent flows with temperature variation, 3 different turbulence models of $k-e$ model, modified $k-e$ model, and Full Reynolds Stress(FRS) model, are applied. 3 Test Case are selected for verification. These are vertical jet flows with water and sodium, and parallel jet flow with sodium. For overall verification of turbulence models, test cases are analyzed with 2-D and 3-D assumptions. Analysis yields the conclusion that 3-D computation with FRS betters others. However, modified modeling for near wall effect is required to improve its heat transfer characteristic analysis

1. 서론

고온과 저온의 온도변화가 현저하게 발생하는 원자로 내부에서는 다양하게 구성되어 있는 노내 구조물에 미치는 열전달 효과를 정확히 분석하는 것이 시스템의 구현을 위해서 뿐만 아니라 그 건전성을 확보하기 위해서 필수적으로 요구된다. 열전달에 의한 여러 가지 연계효과 중에서 최근에는 유동장에서 발생하는 온도변화에 의하여 구조물에 미치는 열전달의 크기가 열피로에 직접적

영향을 미치는 Thermal Stripping의 원인이 되는 것으로 알려져 주목되고 있다. 즉, 유동장에서 발생하는 온도의 요동변화특성이 경계면을 통하여 구조재로 전달되는 열전달의 크기를 결정하게 되는데 주요한 영향인자는 온도요동변화의 주파수와 함께 그 변화크기인 것으로 규명되고 있다. 온도요동변화의 주파수가 비교적 작은 경우에는 인접한 구조재에 열절달 특성이 전달될 수 있는 충분한 시간이 제공되므로 이러한 저 주파수의 온도변화특성이 그 크기, 즉 진폭이 큰 지점에서는 구조재의 온도변화를 현저하게 일으킬 수 있다고 알려져 있다.

난류 유동장의 해석에서 난류유동변수의 변화를 설명하는 주파수의 크기를 알아내기 위해서는 요동성분의 시간에 대한 정보를 정확히 구해내야 한다. 그러나 일반적인 난류모델에 의한 지배식은 평균개념을 적용하여 얻어지므로 원천적으로 요동성분의 시간에 대한 변화를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이를 얻기 위해서는 DNS(Direct Numerical Simulation) 등을 이용한 해석이 요구되는데 이러한 해석은 난류척도에 버금가는 격자계를 형성하여 수행해야 하는 기본 특성으로 인하여 긴 계산시간이 요구되는 현실적 제한성이 있다. 따라서 Muramatsu[1-10] 등과 같은 연구자는 난류모델에 의한 해석을 통하여 온도요동진폭이 큰 영역을 먼저 알아내고 이 영역에 대해서 제한적으로 DNS해석을 수행하는 방법론을 정립하였다. 이와 같은 난류모델에 의한 해석 방법은 DNS해석을 전제로 한 제한적인 경우 뿐만 아니라 전체 유동장의 특성을 파악하여 주 관심대상이 되는 영역을 규명하는데 활용될 수 있는 장점이 있다. 이를 위해서는 유동장의 특성을 올바로 제시할 수 있는 신뢰성 있는 난류모델이 필요하다. 난류모델은 유동형태에 따라 그 예측 성능의 차이를 보이고 있는 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서는 Thermal Stripping 현상이 발생할 가능성이 높은 영역에서 관찰되는 제트 유동 혹은 합류유동 등에 기존의 다양한 난류모델을 적용하여 그 성능을 평가하고 신뢰성 있는 난류모델을 선정하고 필요한 개선 방향을 도출하고저 한다.

2. 본론

2.1 지배방정식과 난류모델

온도변화가 있는 비정상 난류유동장을 표현하는 지배식은 질량, 운동량 및 에너지 보존식과 난류량의 변화를 표현하는 난류모델식으로 구성한다.

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla \cdot \left(r \vec{\mathbf{U}} \right) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial r \vec{\mathbf{U}}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(r \vec{\mathbf{U}} \vec{\mathbf{U}} \right) = \vec{\mathbf{B}} + \nabla \cdot t_{ij} - \nabla \cdot \left(r \overline{\mathbf{uu}} \right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial r \mathrm{H}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(r \vec{\mathbf{U}} \mathrm{H} \right) = \nabla \cdot \left(k \nabla \mathrm{T} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(r \overline{\mathbf{u} h} \right) \tag{3}$$

여기서 r 는 밀도, k 는 열전도계수이다. $\vec{\mathbf{U}}$, H, T 는 각각 속도, 엔탈피, 그리고 온도를 나타내는데 대문자는 평균값을, 소문자는 Fluctuation 값을, Bold체는 벡터를 대표한다. 또한 운동량방정식의 응력항은 다음과 같다.

$$t_{ij} = -r d_{ij} + m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + d_{ij} \, l \cdot \nabla \cdot \vec{\mathbf{U}} \tag{4}$$

식(4)에서 m 는 점성계수이며 l 는 Bulk Viscosity 이다.

운동량방정식 (2)와 에너지 방정식(3)은 시간평균을 한 결과로 각식의 마지막 항으로 나타나는 난류응력 및 난류열속항을 가지고 있다. 이들은 기존의 변수들과 연계하는 모델링을 필요로 하며 다양한 형태의 모델링 기법이 제시되어 있다. 본 연구에서는 비정상 특성을 가지는 유동장에서 열전달이 혼합되어 있는 경우의 예측 성능을 비교하여 모델의 개선 방향을 도출하고저 하는 목적이 있으므로 난류모델은 기존의 모델 중에서 그 신뢰성이 입증된 것을 대상으로 하였다.

우선 난류응력들을 Gradient Transport 개념을 이용하여 모델링한 $k-e$ 모델이 사용되었다. $k-e$ 모델은 적용이 용이하고 비교적 다양한 형태의 유동장에 대하여도 예측이 가능한 폭 넓은 응용성이 있는 장점이 있다. $k-e$ 모델은 등방성 모델이라는 단점이 있으나 비등방성 효과가 현저하지 않은 유동에서는 그 간편성으로 인하여 자주 선호되는 모델이다. 이와 같은 표준형 $k-e$ 모델은 유동 Re 수가 매우 크다는 가정하에서 벽면근처의 유동을 1-D, Couette 유동으로 근사하여 해석하므로서 난류의 발생과 성장에 중요한 역할을 하는 벽면 유동장의 특성을 제대로 예측하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 벽면근처의 유동을 직접 해석하기 위한 다양한 모델의 수정작업이 제시되었는데 본 연구에서는 모델의 신뢰성이 다양하게 입증된 Launder와 Sharma[11]의 수정 $k-e$ 모델(이하 $l-k-e$)을 사용하였다. 이들의 $l-k-e$ 은 벽면효과를 반영하기 위하여 벽면으로부터 거리와 벽면에서의 마찰 속도를 사용하는 대신 국소 난류 Re 수를 사용하므로서 박리 등이 일어나는 복잡한 유동에서도 적용이 가능한 것이 특징이다. FRS는 난류응력과 난류열속에 대한 지배식을 도출하여 이를 모델링하여 사용하는 것으로 본 연구에서는 부력에 따른 압축성 효과가 제대로 반영될 수 있도록 Density-Weighted Average 기법을 적용하여 지배식을 도출하였다. 모델링이 필요한 난류확산항, 압력재분배항 및 소산항 등은 일반적으로 검증된 모델을 사용하였으며 자세한 모델링 내용은 Yoo[12]및 Yoo와 So[13]를 참조할 수 있다.

2.2 수치해석

도입된 난류모델을 포함한 지배방정식들은 CFX[14]코드를 이용하여 수치적으로 해석되었다. 수치해석에서 선택된 해법은 SIMPLE기법을 기반으로 한 Velocity-Pressure Coupling 기법을 사용하고 있다. 시간차분은 Implicit Backward Euler 기법을 적용하였으며 Advection항은 Hybrid Differencing을 채택하였다.

과도상태를 해석하기 위한 시간증분은 10^{-3}sec로 설정하여 실험에서의 Data와 상세한 비교가 가능하도록 하였으며 분사된 제트유동이 정상상태에 충분히 도달한 약 1sec의 기간동안을 계산시간으로 설정하였다. 수렴조건은 매 시간 단계에서 Mass Residual을 기준으로 5×10^{-4}이상의 정확도를 유지하도록 하였으며 여기서 운동량 방정식과 에너지방정식 또한 최대 400회의 반복계산이내에서 동일한 수렴조건을 만족하였음을 확인하였다.

2.3 해석대상의 선정

본 연구에서 난류모델의 성능 검증용으로 선정한 해석대상은 정립된 해석방법론이 충돌 제트유동 혹은 배관합류 유동 등에 적용될 것임을 감안하여 제트유동을 중심으로 선정하였다. 선정된 제트유동은 Table 1에 보인 바와 같이 물 혹은 소듐이 제트의 분사 방향으로 수직 혹은 수평으로 놓이도록 설정되었다. 각 경우별 해석영역은 실험에 의한 자료가 측정된 지점을 포함할 수 있도록 설정되었으며 제트의 분사위치와 시험평면의 위치를 포함한 기하학적 상세가 Figs. 1과 2에 제시되었다. Case B의 기하학적 상세는 Case A와 매우 유사하므로 별도의 그림을 생략하였다. Case A와 B는 X와 Y방향으로 51×21의 격자를, Case C의 경우에는 X, Y 및 Z 방향으로 62×30×29의 격자를 배치하였다.

Table 1. Summary of Analysis Cases

Case	제트에 대한 평판의 방향	제트온도(K)		제트속도(m/s)		참고문헌
		Hot	Cold	Hot	Cold	
Case A (물)	수직	303	293	2.554	2.554	(1)
Case B (소듐)	수직	593	553	1	1	(5)
Case C (소듐)	수평	593	553	1	1	(10)

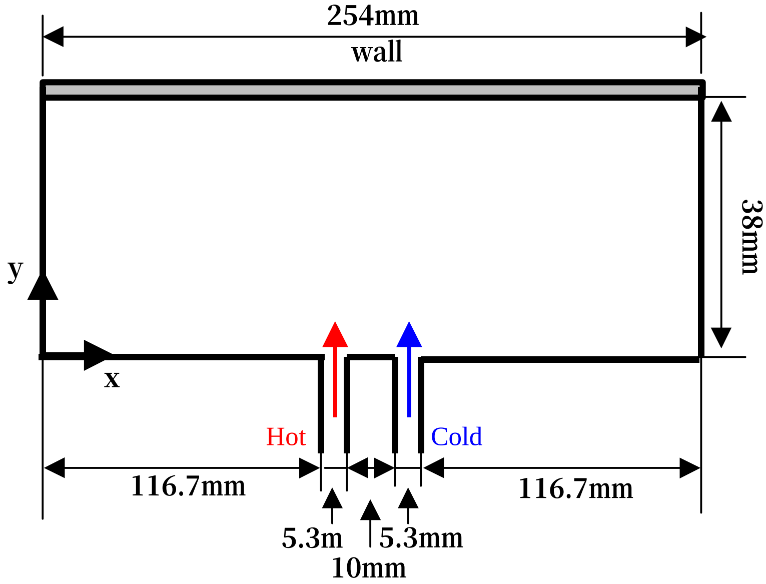


Fig. 1 Geometry of Case A

각 해석 대상에서 제트의 분사유동은 주어진 유량과 온도를 기준으로 Uniform Flow를 가정하여 분사하였다. 시험편이 위치한 벽면에서는 속도에 대한 No-slip 및 No-penetration 조건을 적용하고 온도에 대하여는 짧은 계산 시간을 고려하여 시험편 외부의 온도가 저온제트의 온도와 동일하다고 가정하고 계산 영역으로부터 시험편을 거쳐 열전달이 이루어지는 조건을 설정하였다. 기타의 공간은 Mass의 유출입이 자유로운 점을 감안하여 각 변수에 대하여 Neumann 조건을 적용하는 소위 압력경계조건을 사용하였다.

2.4 해석결과

2.4.1 수직평판을 가진 유동장의 해석

수직평판에 대하여 분사된 제트에 의하여 형성된 유동장을 분석한 Case A와 B는 유사한 기하학적 조건을 가지고 있으나 제트에서 분사되는 유체가 각각 물과 액체나트륨으로 서로 다르며 고온수와 저온수의 온도가 다른 차이점을 보이고 있다. Case A와 B는 2-D유동을 가정하여 해석되었다.

전체적인 유동특성을 파악하기 위하여 Fig 3에서는 Case A의 분사된 제트유동에 의하여 형성

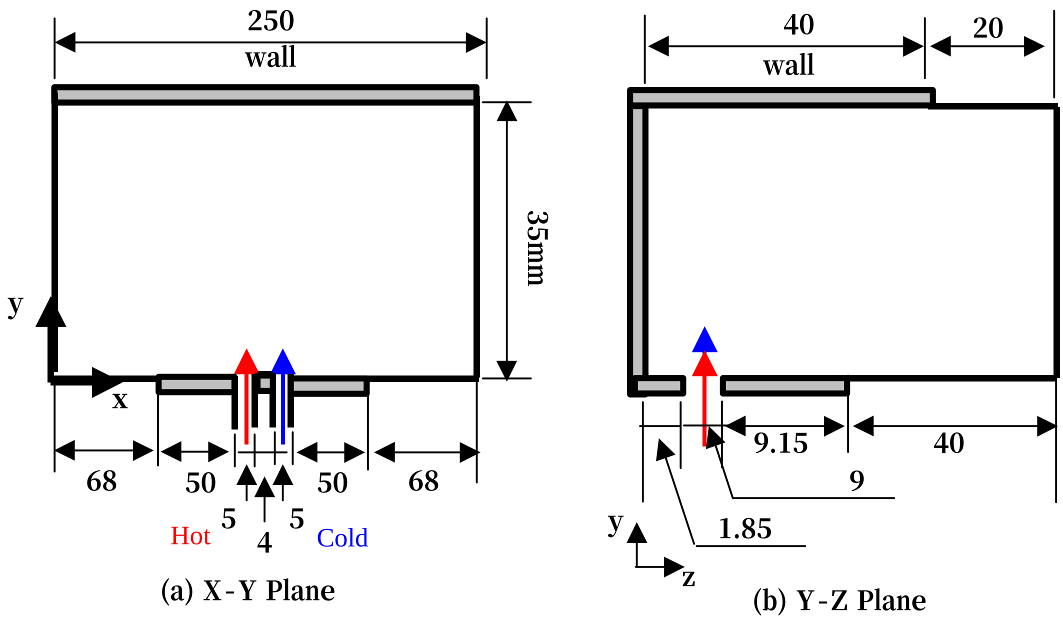


Fig. 2 Geometry of Case C

된 유동이 정상상태에 도달하기까지 전체 유동장의 속도 변화를 FRS에 의한 결과를 이용하여 보이고 있다. 전체적인 유동장은 각각의 제트유동이 분사되어 평판에 충돌한 후에는 평판을 따라 매끄럽게 유출되고 있는 모습과 고온과 저온의 제트류 사이에서는 재 순환 영역이 형성되었음을 보이고 있다. 시간이 경과함에 따라 고온 및 저온 영역이 각각 확대되고 있음을 보이나 고온과 저온수가 교차되어지는 혼합효과는 제트유동의 대칭성으로 인하여 나타나고 있지 않다. 이는 이 경우의 해석이 2-D로 가정하여 이루어져 3-D형태의 와류 효과가 배제되어 있기 때문이다. Case B의 경우도 Case A와 유사한 속도 변화를 보이고 있으며 이에 따라 그 결과의 제시는 생략하였다.

Figs. 4와 5에는 각각 Case A와 B에 대하여 난류유동장의 특성을 분석하기 위하여 난류 운동에너지, k의 분포를 제시하였다. Case A에 대한 해석에서는 고온 영역인 Point 1 주변에서 전반적으로 높은 k의 분포를 보이고 중앙 부분인 Point 3에서는 비교적 낮은 k의 분포를 보이고 있다. 그림에 제시하지는 않았으나 저온 영역인 Point 5 주변에서도 고온 영역인 Point 1 주변에서의 k의 분포와 유사한 특성을 보이고 있다. 이는 고온 및 저온 영역에서는 제트유동이 시험평판에 충돌 후 방향을 전환하여 재발달하면서 난류 운동에너지의 생성이 안정화 단계에 들어 갔으나 중앙 부분에서는 고온 및 저온수의 분리가 일어나는 정체점의 특성을 보여 난류에너지의 생성이 반영되지 않는 2차원적 특성을 보이기 때문이다. 각 모델에 의한 예측 값은 유사하나 벽면 근처 영역인 y=0.4mm지점에서는 $l-k-e$ 에 의한 예측 값이 현저하게 큰 값을 가지고 있는데 이는 벽면에서의 수정 모델의 과도한 수정 영향으로 추정된다. Fig 5에 보인 Case B의 난류 운동에너지 분포에서는 벽면근처의 Point 4에서부터 층류와 난류 영역에 위치하는 Point 2 그리고 3의 순으로 증가함을 볼 수 있어 난류 유동의 물리적 특성이 제대로 반영되고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 FRS에 의한 난류운동에너지의 크기가 다른 모델의 예측결과에 비하여 상대적으로 크게 예측되고 있는 특징을 보이고 있다.

Figs. 6과 7에는 Case A의 측정점 1, 3 및 5에서 평균온도변화를 실험결과와 함께 각 모델별로 제시하였다. 여기서 모델에 의한 계산 결과는 평균값을 제시하고 있으나 실험에 의한 결과는 순간변화량을 제시하고 있어 상응하는 비교를 위하여 실험결과를 최대와 최소 온도변화영역으로 표시하였다. 전반적으로 온도의 변화는 초기의 과도상태를 지나 약 0.2초 이내에 빠르게 정상상태로 안정화되는 경향을 보이고 있으며 모델별로는 FRS에 의한 결과가 가장 실험결과와 근접하고 있

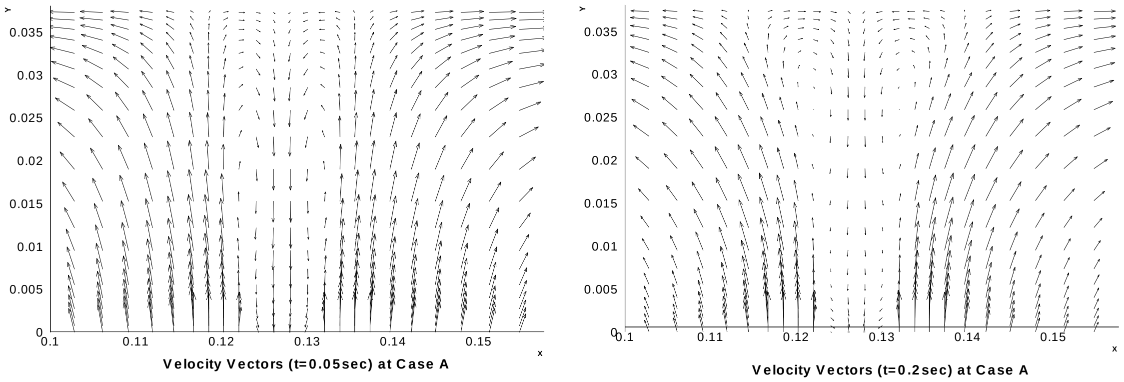
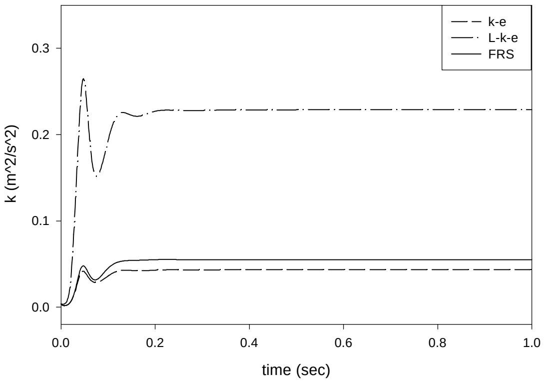
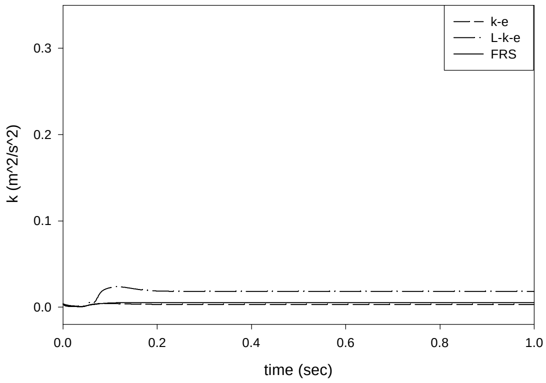


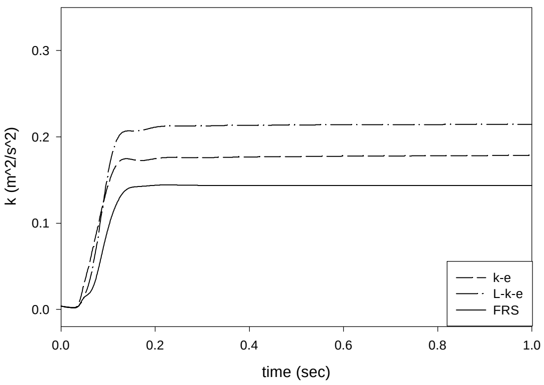
Fig. 3 Velocity Distribution of Case A



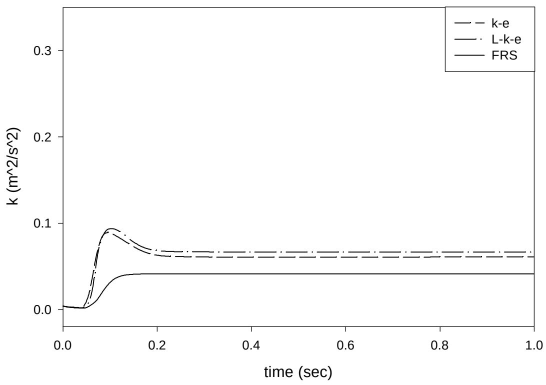
Variation of k at point 1 in Case A (y=0.4mm)



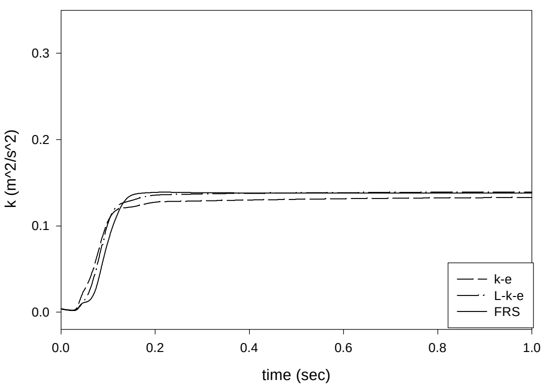
Variation of k at point 3 in Case A (y=0.4mm)



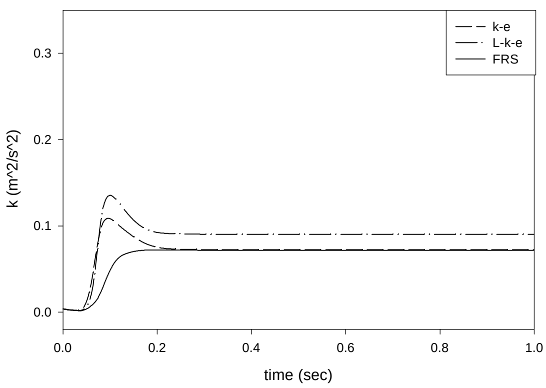
Variation of k at point 1 in Case A (y=2mm)



Variation of k at point 3 in Case A (y=2mm)

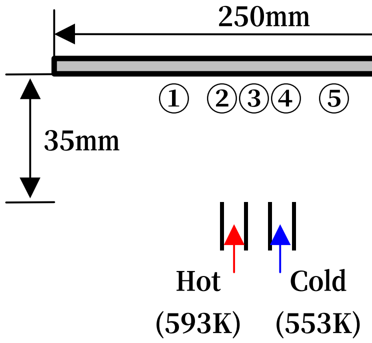


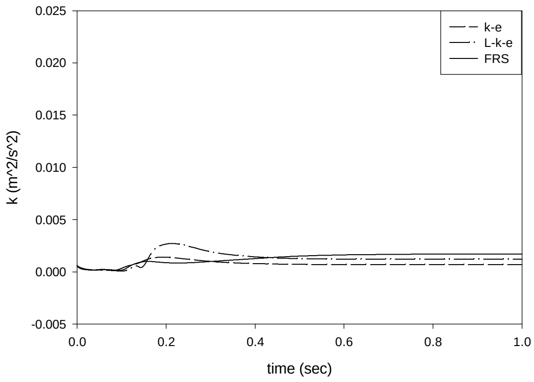
Variation of k at point 1 in Case A (y=5mm)



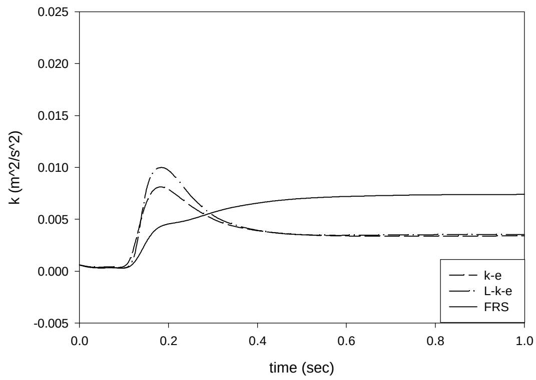
Variation of k at point 3 in Case A (y=5mm)

Fig. 4 Variation of Turbulent Kinetic Energy in Case A

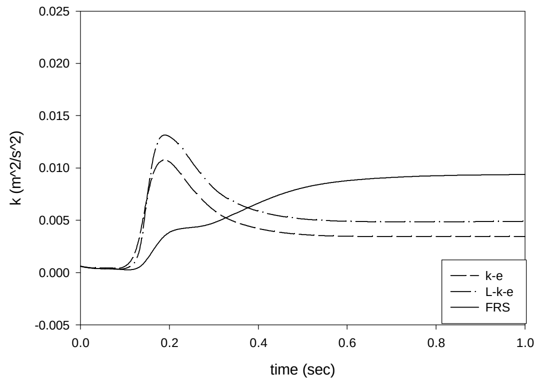




Variation of k at point 4 in Case B (y=0.2mm)

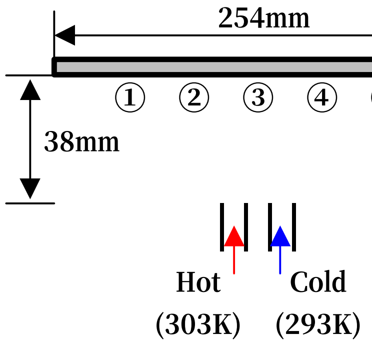


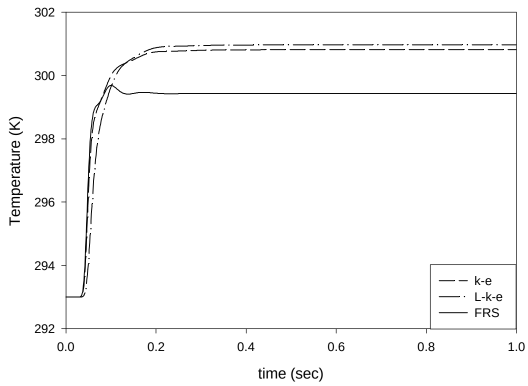
Variation of k at point 2 in Case B (y=0.3mm)



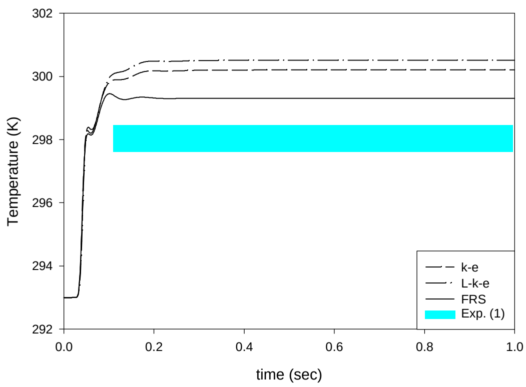
Variation of k at point 3 in Case B (y=1.5mm)

Fig. 5 Variation of Turbulent Kinetic Energy in Case B

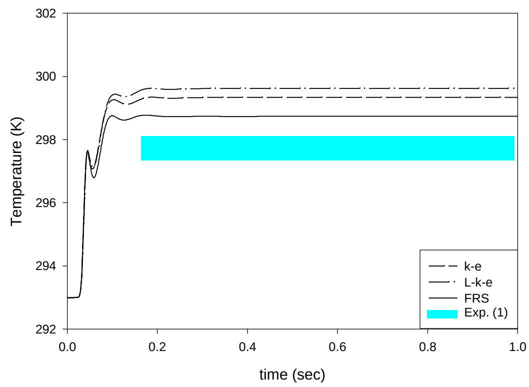




Variation of Temperature at point 1 in Case A (y=0.4mm)

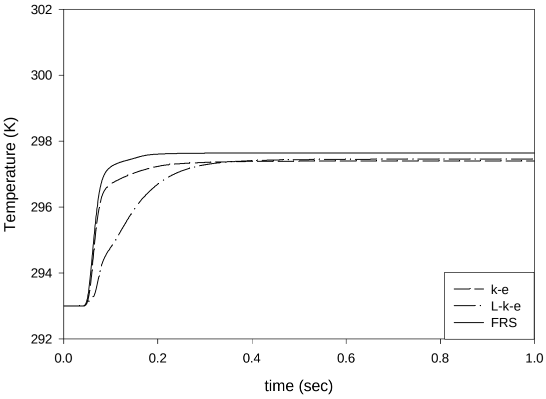


Variation of Temperature at point 1 in Case A (y=2mm)

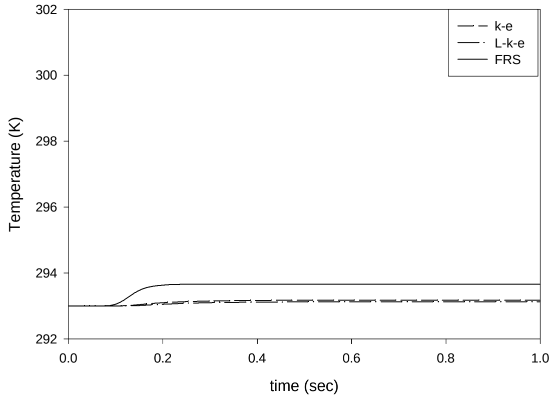


Variation of Temperature at point 1 in Case A (y=5mm)

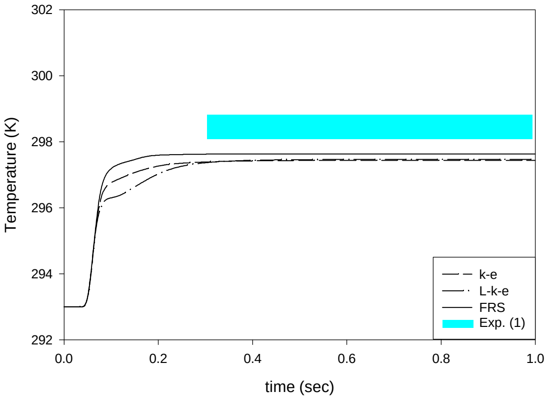
Fig. 6 Variation of Temperature at Point 1 in Case A



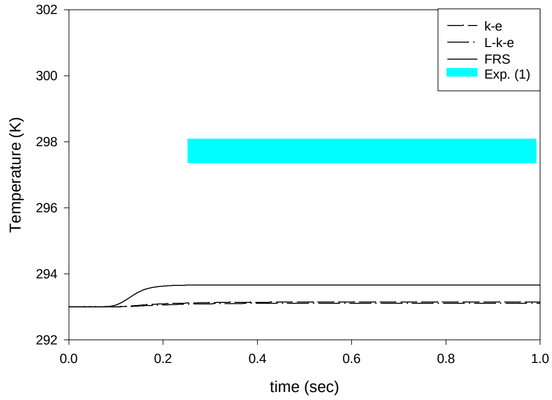
Variation of Temperature at point 3 in Case A (y=0.4mm)



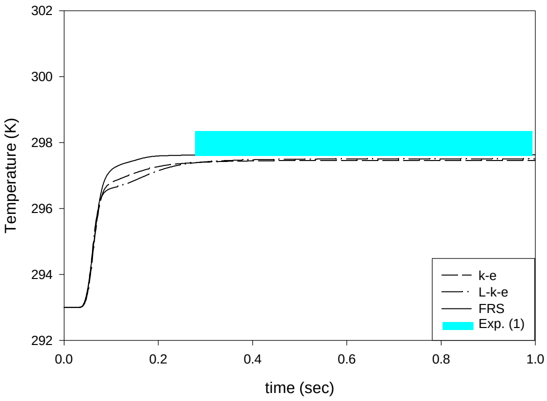
Variation of Temperature at point 5 in Case A (y=0.4mm)



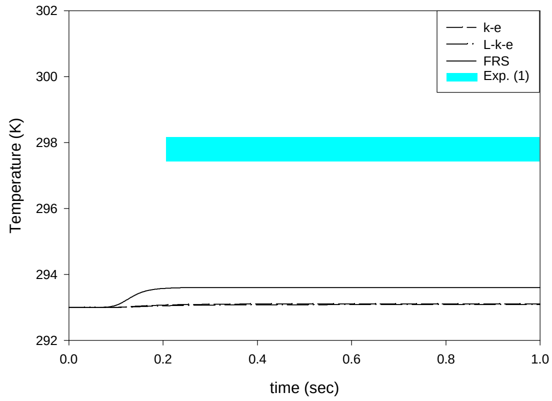
Variation of Temperature at point 3 in Case A (y=2mm)



Variation of Temperature at point 5 in Case A (y=2mm)



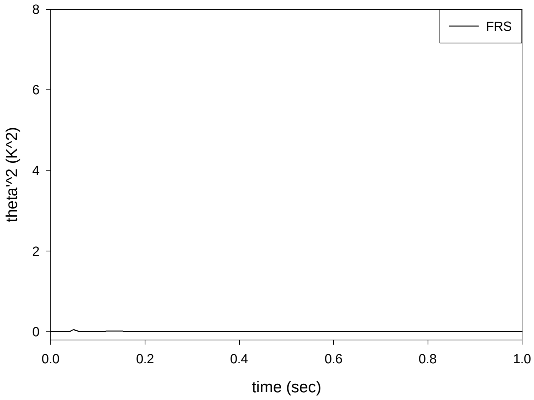
Variation of Temperature at point 3 in Case A (y=5mm)



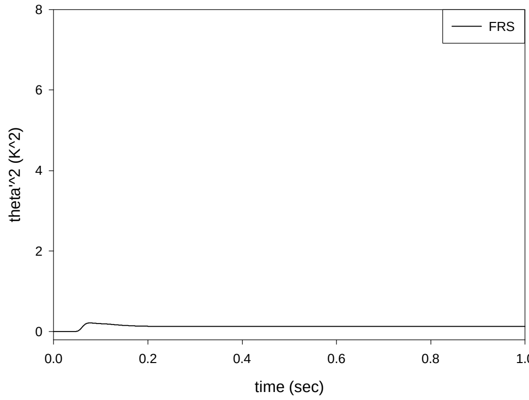
Variation of Temperature at point 5 in Case A (y=5mm)

Fig. 7 Variation of Temperature at Point 3, 5 in Case A

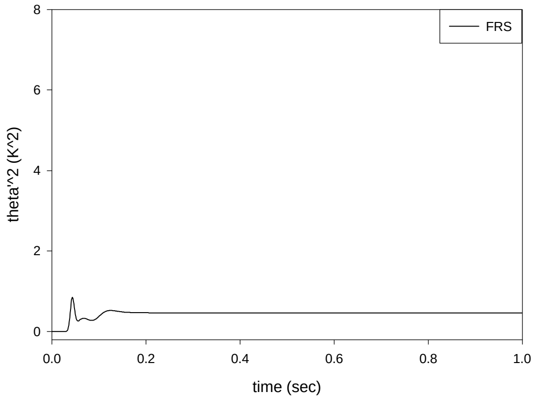
는 특징을 보이고 있다. 그러나 고온 영역인 1번 지점에서는 전반적으로 실험결과보다는 큰 온도를 예측하고 저온 영역인 5번 지점에서는 낮은 온도를 예측하고 있어 고온수와 저온수의 혼합효과가 미미함을 보이고 있다. 이는 Fig. 8에 보인 온도의 Variance($\overline{q'^2}$)값의 비교에서도 중앙부인 3번 지점 외에서는 그 크기가 미미한 것을 보아 난류 유동의 강도가 전 영역으로 확산되지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 해석 결과는 앞서 지적하였듯이 Case A의 해석이 2-D 가정하에 이루어져 혼합효과의 반영에 제한이 있었음을 감안할 때 이해할 수 있는 제한 조건이다. 그러나 층류영역인 y=2mm 지점에서 난류영역인 y=5mm 지점으로 이동하면서 온도 Variance의 크기가 최대로 상승하고 있는 물리적 특성은 잘 나타나고 있다.



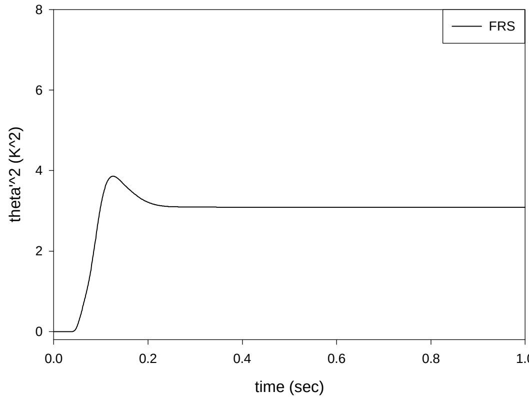
Variation of Temperature Variance at point 1 in Case A (y=0.4mm)



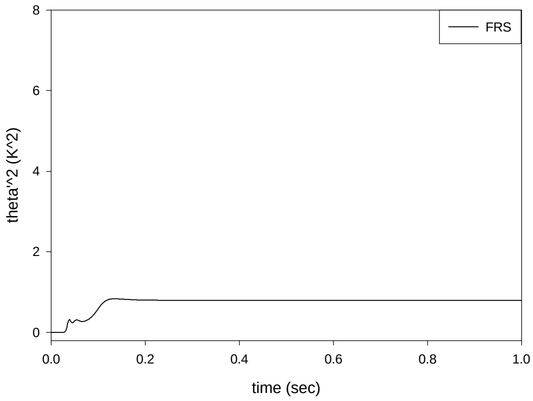
Variation of Temperature Variance at point 3 in Case A (y=0.4mm)



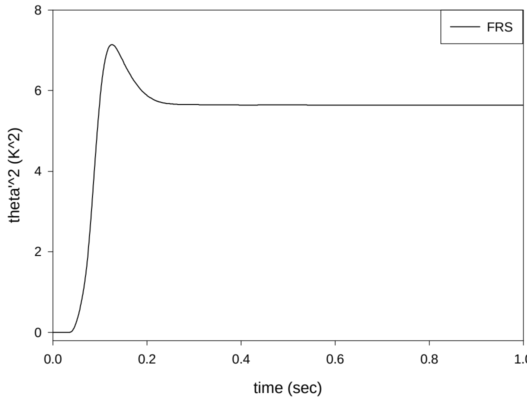
Variation of Temperature Variance at point 1 in Case A (y=2mm)



Variation of Temperature Variance at point 3 in Case A (y=2mm)



Variation of Temperature Variance at point 1 in Case A (y=5mm)

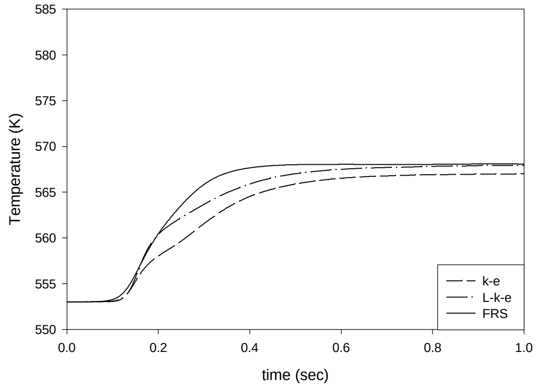


Variation of Temperature Variance at point 3 in Case A (y=5mm)

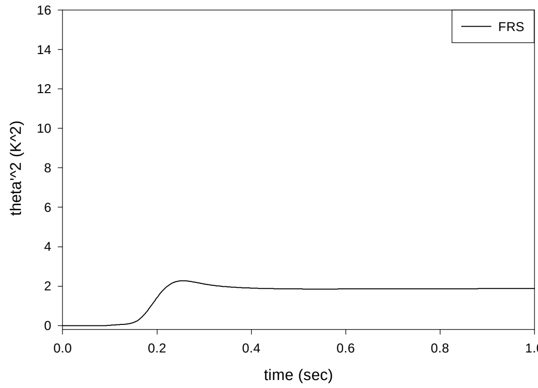
Fig. 8 Variation of Temperature Variance in Case A

Fig. 9에는 Case B에 대하여 구한 온도변화특성이 제시되고 있는데 평균온도의 경우 Case A와 유사하게 비교점의 위치와 노즐의 출구 위치의 상대 관계에 따라 온도의 높낮음이 유지되고 있음을 볼 수 있다.

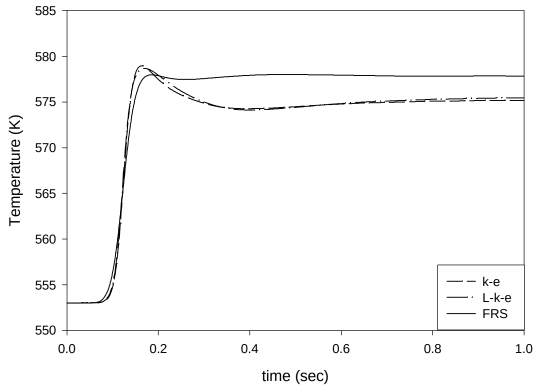
Case B의 온도분포에서는 Case A에 비하여 정상상태에 진입하는 시간이 0.4초 정도로 다소 지연되고 있는데 이는 노즐에서의 분사 속도가 Case A에서는 2.554m/s정도인데 비하여 Case B에서는 1m/s 정도로서 운동량의 크기가 작아 에너지의 전달이 지연되었기 때문이다. 온도 Variance의 비교에서는 Case A와 유사하게 난류영역에서 가장 큰 값의 분포를 보이는 물리적 특성을 올바로 반영하고 있음을 볼 수 있다.



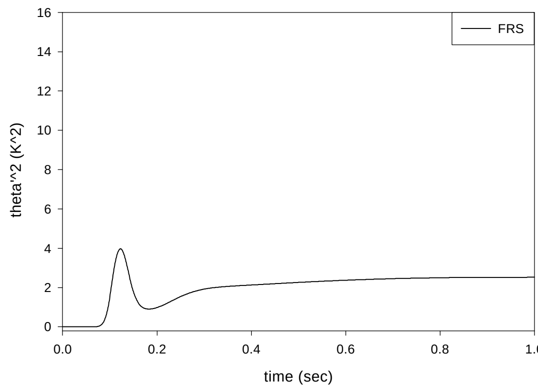
Variation of Temperature at point 4 in Case B (y=0.2mm)



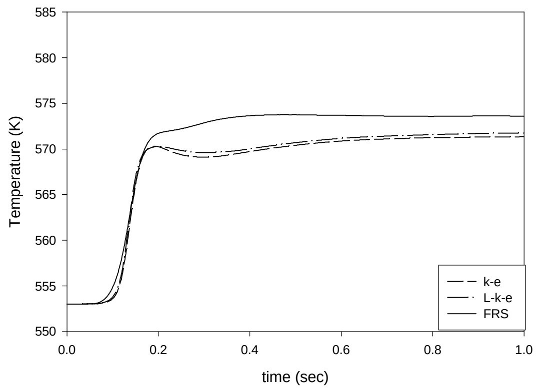
Variation of Temperature Variance at point 4 in Case B (y=0.2mm)



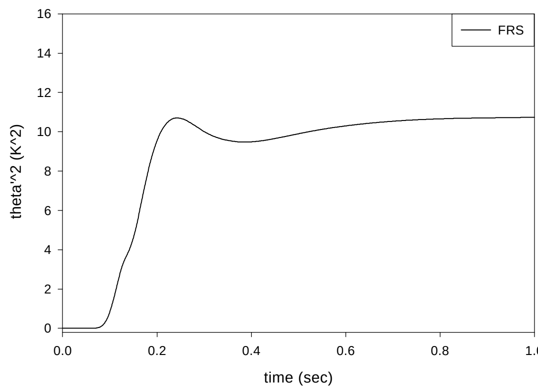
Variation of Temperature at point 2 in Case B (y=0.3mm)



Variation of Temperature Variance at point 2 in Case B (y=0.3mm)



Variation of Temperature at point 3 in Case B (y=1.5mm)



Variation of Temperature Variance at point 3 in Case B (y=1.5mm)

Fig. 9 Variation of Temperature and its Variance in Case B

2.4.2 수평평판을 가진 유동장의 해석

Case C는 액체나트륨이 593K의 고온측과 553K의 저온측에서 각각 1m/s의 속도로 분사되고 이와 평행한 수평평판이 있는 유동장을 분석한 것이다. Fig. 10에서는 분사된 제트 유동에 대하여 형성된 유동이 정상상태에 도달하기까지 유동장의 속도변화를 FRS에 의한 결과를 이용하여 제시하였다. 그림에서 Z는 수평평판으로부터의 거리로 Z=0.00125m 지점은 수평평판에 근접한 지점을, Z=0.00635m는 제트노즐 중앙부를 나타낸다. 분사초기에는 정지되었던 유체가 제트유동에 의하여 순환하기 시작하여 제트유동 외곽으로 큰 와류를 형성하고 제트에 의하여 상승하는 유체 흐름으로 인하여 벽면근처에서는 하강하는 유동특성을 보이고 있다.

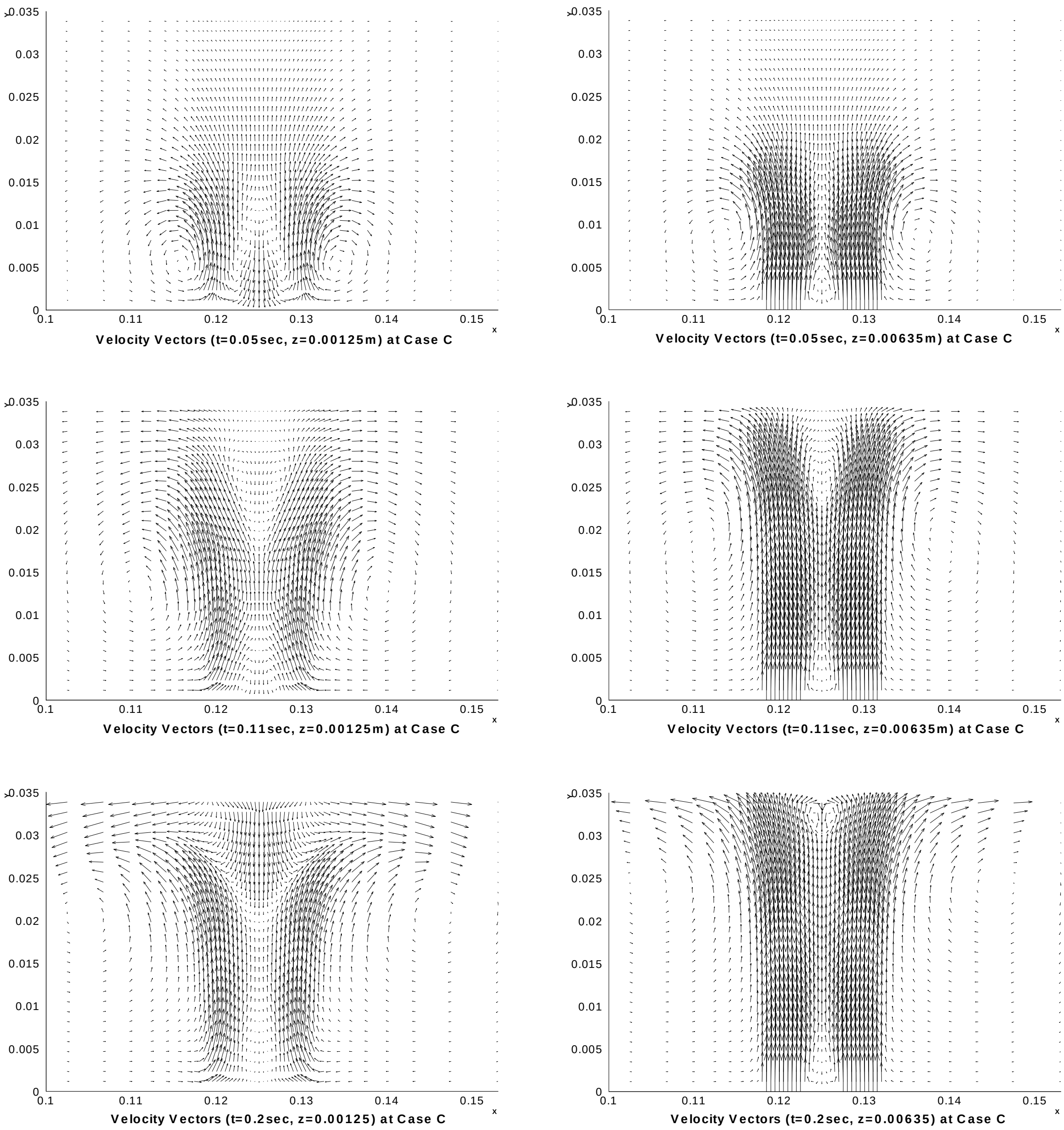
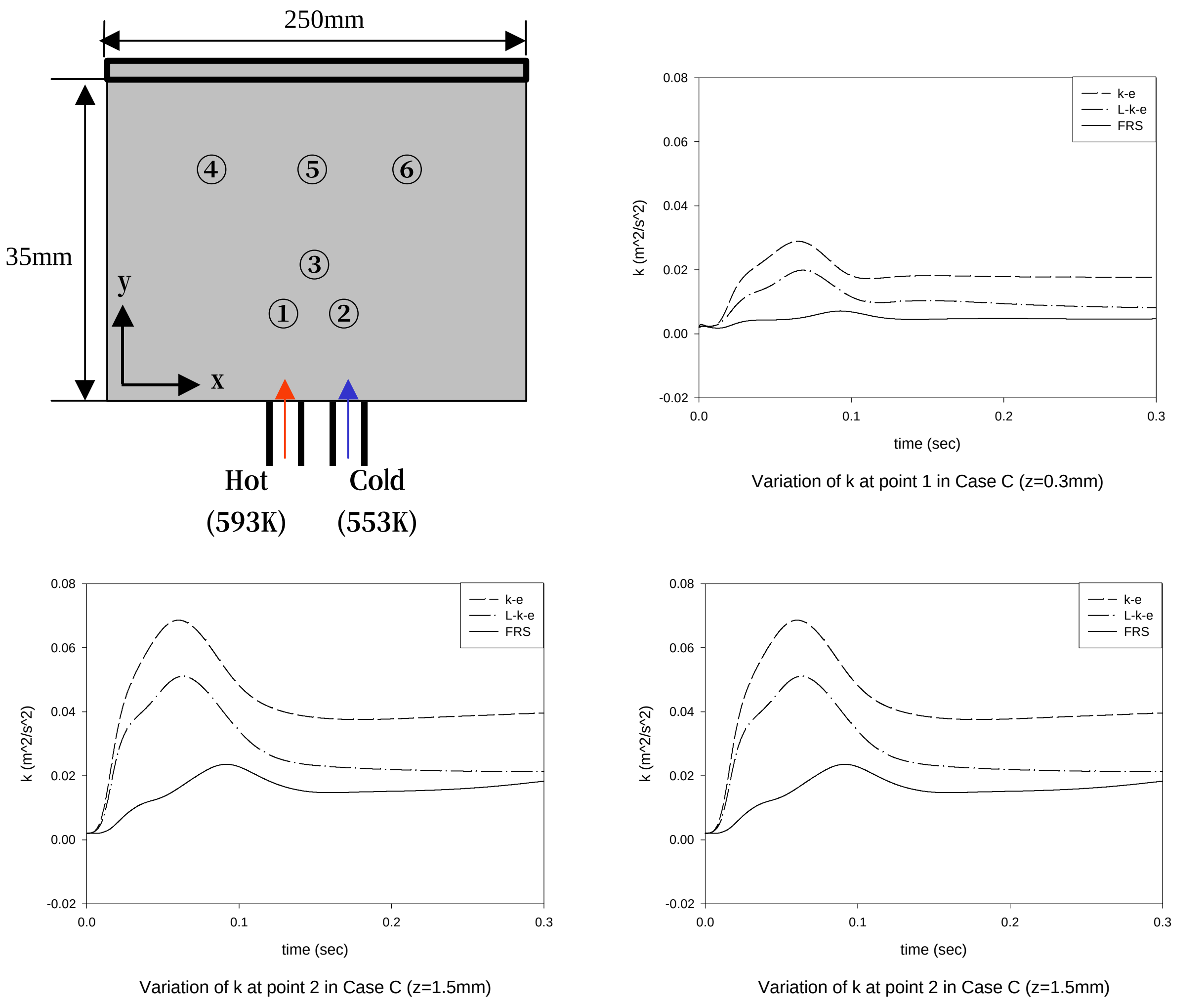


Fig. 10 Velocity Distribution of Case C

시간이 경과하며 제트외곽의 와류는 점차 그 중심 위치가 상부 억제판 쪽으로 이동하여 영향력을 증대시키며 충분한 시간이 경과한 후에는 상부의 수직평판에 충돌한 후 재발달되는 정상상태의 거동을 보인다. 3-D 해석을 수행한 Case C의 유동패턴은 X-Y평면에서는 대칭의 특성을 보이나 Z방향의 속도 성분으로 인하여 3차원적 혼합효과를 잘 보이고 있다. 그러나 여기서도 고온수와 저온수의 교차움직임은 뚜렷이 관찰되지 않고 있다.

Fig. 11에는 Case C의 난류운동에너지 분포를 제시하였다. 벽면 근처에서부터 층류영역, 그리고 난류영역에 위치한 Point 3, 1, 그리고 2의 순으로 난류운동에너지의 값이 증가하는 물리적 특성을 반영하고 있다. 그러나 Case A와 유사하게 $l-k-e$ 은 전반적으로 큰 값을 예측하고 있는데 실험 자료의 부재로 인하여 정확한 모델의 성능을 판단하기가 어려운 상황이다.



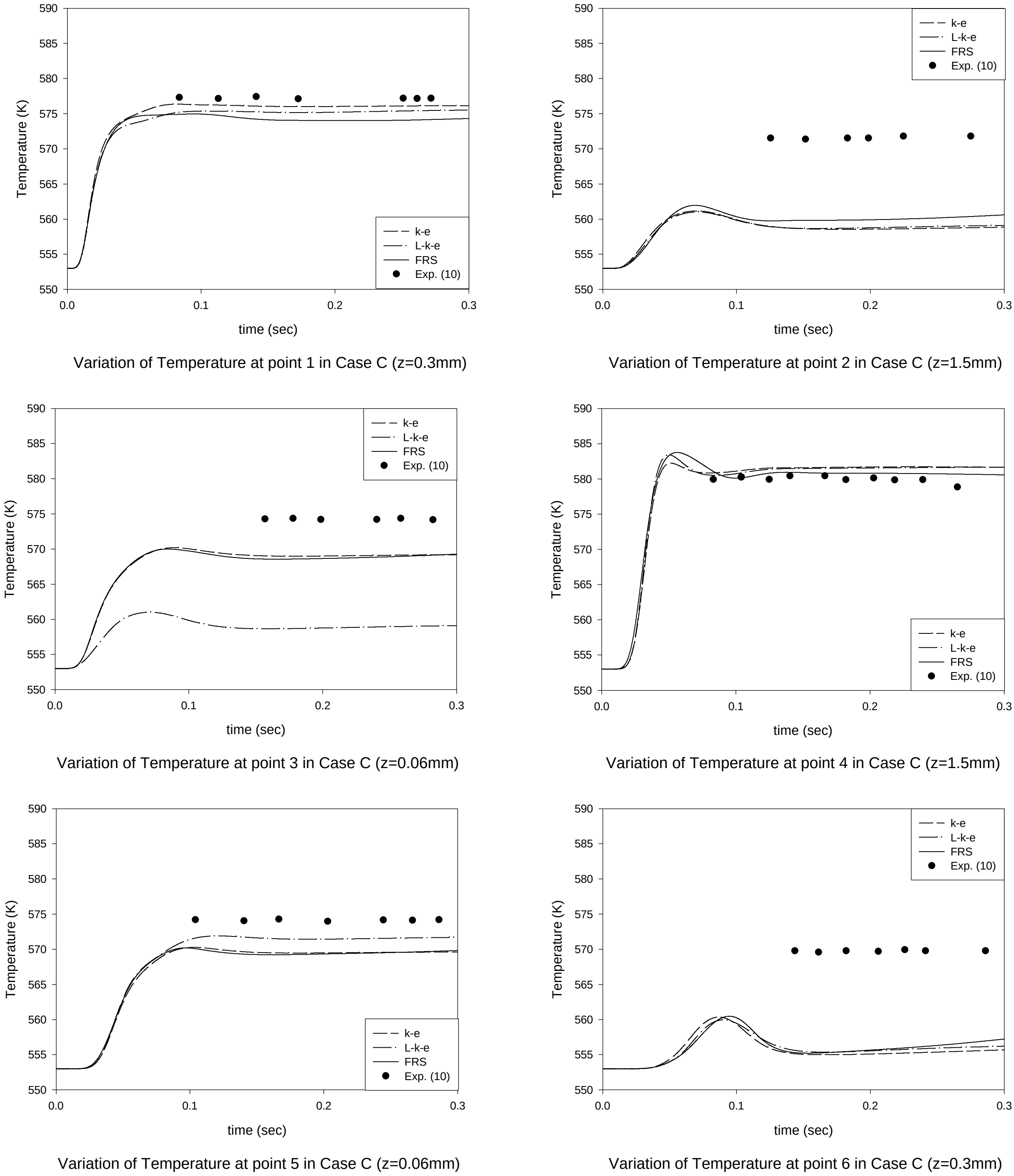
Variation of k at point 1 in Case C (z=0.3mm)

Variation of k at point 2 in Case C (z=1.5mm)

Variation of k at point 2 in Case C (z=1.5mm)

Fig. 11 Variation of Turbulent Kinetic Energy in Case C

Fig. 12는 각 지점에서의 평균 온도 변화를 제시하고 있다. 전반적으로 각 지점에서의 온도는 분사 제트의 고온 혹은 저온 영역의 위치에 따라 비례적 분포를 보이고 있다. 저온 영역에 속한 Point 2와 6의 경우를 제외하고는 실험 결과와 잘 일치된 결과를 제시하고 있다. 저온 측에서 보이는 온도의 차이는 고온수와 저온수의 혼합 능력이 아직 크지 못해서 발생하는 것으로 보인다. 그러나 3-D 해석을 수행한 Case C의 경우는 2-D 해석을 수행한 Case A의 결과에 비하여 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 이는 3-D해석의 경우가 2-D 해석의 경우에 비하여 실험결과에 미치지는 못하나 혼합효과의 반영능력이 우수하기 때문으로 분석된다. 모델별 예측성능은 Point 3에서 $l-k-e$ 가 현저한 저평가 결과를 제시한 것을 제외하고는 유사한 것으로 나타났다. Fig. 13에는 온도의 Variance 분포를 제시하였다. 해석결과는 난류영역인 Point 2와 4 지점에서 큰 값을 층류영역인 Point 1과 6에서는 작은 값을 보이는 물리적 특성을 반영하고 있으나 벽면 근처인 Point 3 과 5에서는 다소 과도한 예측을 하고 있음을 보이고 있다. 여기서 실험결과는 그 크기가 매우 작아 상호 비교가 어려워 보인다. 그러나 실험결과는 정상상태에서 측정한 것이고 해석결과는 제트유동형성 초기의 현저한 과도특성을 보이고 있는 점과 정상상태로 변화하면서 온도 Variance가 점차 안정화되는 경향이 있는 것을 고려하면 그 차이를 이해할 수 있다. 이를 확인하기 위해서는 보다 긴 시간에 대한 추가적인 해석이 요구됨을 알 수 있다.



Variation of Temperature at point 1 in Case C (z=0.3mm)

Variation of Temperature at point 2 in Case C (z=1.5mm)

Variation of Temperature at point 3 in Case C (z=0.06mm)

Variation of Temperature at point 4 in Case C (z=1.5mm)

Variation of Temperature at point 5 in Case C (z=0.06mm)

Variation of Temperature at point 6 in Case C (z=0.3mm)

Fig. 12 Variation of Temperature in Case C

3. 결론

유동장의 온도변화가 주변의 경계면에 영향을 주어 발생하는 Thermal Stripping 현상은 온도변화의 진폭과 주파수에 따라 결정되는 것으로 알려져 있다. 이러한 Thermal Stripping 현상의 분석에서 경제적이고 효과적인 접근을 위하여 현상의 발생 가능성이 높은 영역을 확인하는 작업이 요구되는데 이는 신뢰성 있는 난류모델에 의한 해석으로 가능하게 된다. 이러한 신뢰성 있는 난류모델을 확인하기 위하여 수직 및 수평평판에 분사되는 제트 유동장에 대한 분석을 수행하였다. 해석결과의 분석을 통하여 난류유동장은 3-D로 해석 되어야 하며 FRS에 의한 해석결과가 속도장

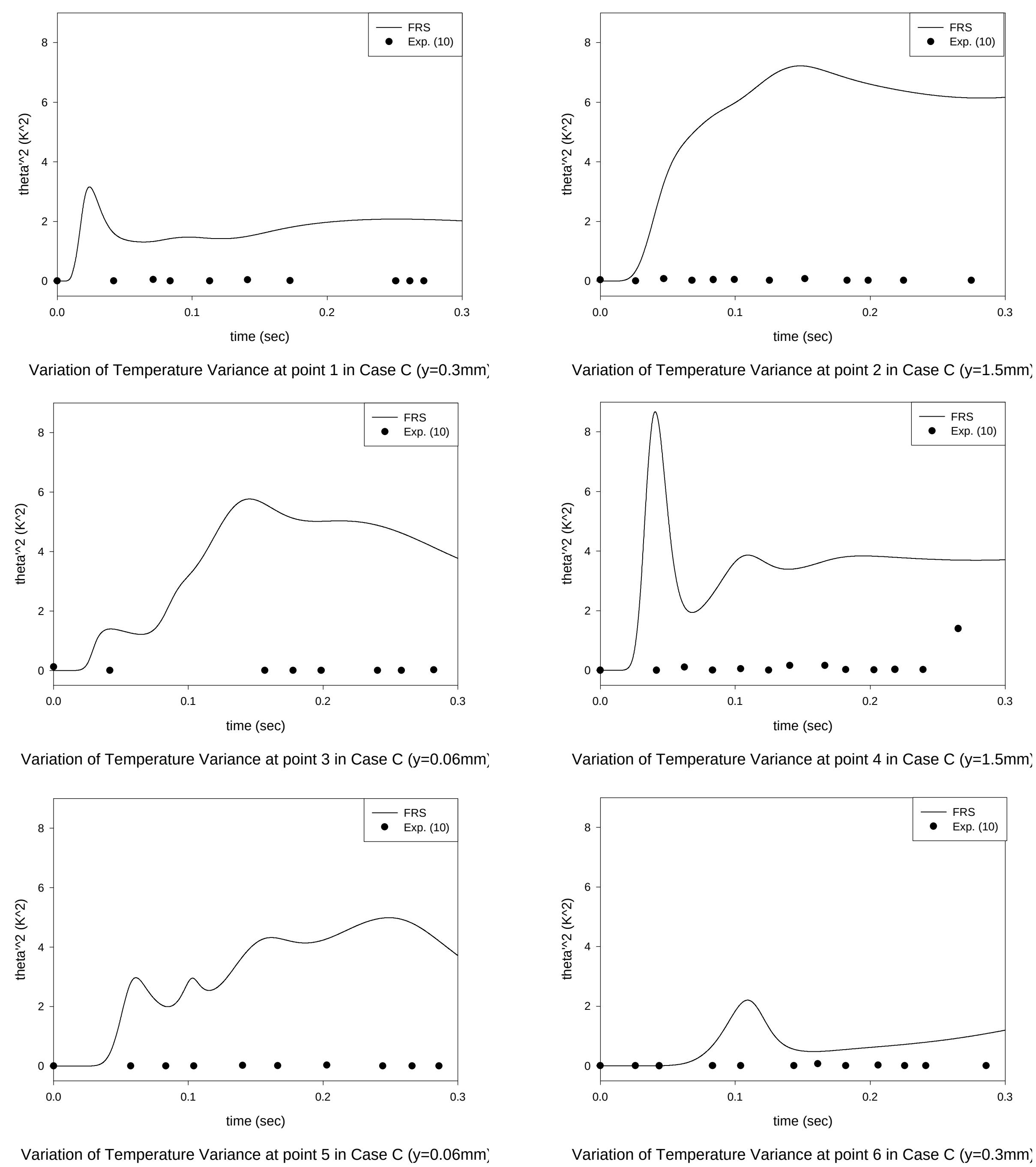


Fig. 13 Variation of Temperature Variance in Case C

과 온도장에 대한 상세정보를 제공할 수 있으며 다른 모델에 비하여 실험결과와 근접하는 신뢰성을 보임을 확인하였다. 그러나 이러한 FRS도 경계면으로 직접적인 열전달이 이루어지는 벽면근처 영역에 대한 예측능력의 향상을 위해서는 이에 관한 수정모델이 도입되어야 하는 필요성이 있음을 확인하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

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

(2) 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)

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

(4) 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)

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

(6) Murakami, S. and Muramatsu, T., "Numerical Investigation on Turbulence Mixing Characteristics under Thermal Striping Flows", JNC TN9400 99-050, May (1999)

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

(8) Muramatsu, T., "Numerical Investigation on Thermal Striping Conditions for a Tee Junction of LMFBR Coolant Pipes(III)", JNC TN9400 99-032, Apr. (1999)

(9) Muramatsu, T., "Numerical Investigation on Thermal Striping Conditions for a Tee Junction of LMFBR Coolant Pipes(II)", PNC TN9410 98-044, Jun. (1998)

(10) 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)

(11) Launder B.E and Sharma, B.T., Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, Leff. Heat and Mass Transfer Vol.1, 131-138, (1974)

(12) YOO , G.J., Low-Reynolds-Number modeling of complex turbulent flows with and without density variation, Ph.D. Thesis, Arizona State University, U.S.A., (1988)

(13) YOO, G.J. and So, R.M.C., Variable density effects on axisymmetric sudden-expansion flows, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 32, 105-120, (1989)

(14) AEA Technology, CFX-F3D Code, Ver.4.2, U.K., (1997)