

온도변화를 수반한 비정상 난류유동장에 대한 난류모델의 적용성에 관한 연구

유근종* · 전원대**

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

Geun Jong Yoo* · Won Dae Jeon**

ABSTRACT

The suitable turbulence model is found to be required in the course of establishing a proper analysis methodology for thermal stripping phenomena which are shown in strong temperature variation area such as reactors and propulsion devices. Three different turbulence models of $k-\epsilon$ model, modified $k-\epsilon$ model, and full Reynolds stress(FRS) model, are applied to analyze unsteady turbulent flows with temperature variation. Three test cases are selected for verification. These are vertical jet flows with water and sodium, and parallel jet flow with sodium. Analysis yields the conclusion that 3-D computation with FRS betters others. However, modified modeling is required to improve its heat transfer characteristic analysis. Further analysis is performed to find momentum variation effects on temperature distribution. It is found that the momentum increase results increase of fluid mixing and magnitude of temperature variation.

초 록

Thermal stripping을 수반한 난류유동장에 대한 해석방법론 정립에 필요한 신뢰성 있는 난류모델을 선정하기 위하여 온도변화가 있는 비정상 난류유동장에 $k-\epsilon$ 모델, 수정 $k-\epsilon$ 모델, 그리고 full Reynolds stress(FRS) 모델을 적용하였다. 검증대상으로는 thermal stripping 현상이 자주 관찰되는 원자로 혹은 추진기구부 등에서 보이는 수직평판과 수평평판에 대한 제트유동이 있는 유동장을 선정하였으며 이 때의 유체로는 물 혹은 액체나트륨을 사용하였다. 분석결과 비정상 난류유동장은 FRS를 사용하여 3-D로 해석할 때 가장 나은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 경계면 부근을 비롯한 유동장내에서의 열전달 특성 분석의 정확성을 제고하기 위해서는 이를 위한 수정모델의 도입이 요구된다. 아울러 제트유동의 운동량이 thermal stripping 현상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 제트유동의 유속을 변화

• 2001년 9월 14일 접수 ~ 2002년 3월 15일 심사완료

* 종신회원, 창원대학교 기계설계공학과 (Dept. of Mechanical Design and Manufacturing, Changwon National Univ.)
주연락저자, E-mail : gjyoo@sarim.changwon.ac.kr, 경남 창원시 사림동 9

** 학생회원, 창원대학교 기계설계공학과 대학원 (Dept. of Mechanical Design and Manufacturing, Graduate School, Changwon National Univ.)

시켜 이에 따른 영향을 점검한 결과 운동량의 증가는 유동장의 혼합능력을 증가시키고 온도변화 진폭을 상승시키는 것으로 나타났다.

Key Words : Thermal Stripping, Turbulence Model, Unsteady Flow, Jet Flows

1. 서론

고온과 저온의 온도변화가 현저하게 발생하는 원자로 혹은 가스터빈 등과 같은 추진기구부 내부의 유동장에서는 유동장의 경계를 이루는 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 열전달이 열피로에 직접적 영향을 미치는 thermal stripping의 원인이 되는 것으로 알려져 주목되고 있다. 즉, 유동장에서 발생하는 온도의 요동변화특성이 경계면을 통하여 구조재로 전달되는 열전달의 특성을 결정하게 되는데 주요한 영향인자는 온도요동변화의 주파수와 함께 그 변화 크기인 것으로 규명되고 있다.

난류 유동장의 해석에서 난류유동변수의 변화를 설명하는 주파수의 크기를 알아내기 위해서는 순간변수의 시간에 대한 정보를 정확히 구해내야 한다. 그러나 일반적인 난류모델에 의한 지배식은 평균개념을 적용하여 얻어지므로 원칙적으로 순간변수의 시간에 대한 변화를 얻을 수 없다는 단점이 있다. 이를 얻기 위해서는 DNS(Direct Numerical Simulation) 등을 이용한 해석이 요구되는데 이는 난류척도에 버금가는 격자계를 형성하여 수행해야 하는 기본 특성으로 인하여 긴 계산시간이 요구되는 현실적 제한성이 있다. 따라서 Muramatsu⁽¹⁻⁷⁾ 등과 같은 연구자는 난류모델에 의한 해석을 통하여 온도요동진폭이 큰 영역을 먼저 알아내고 이 영역에 대해서 제한적으로 DNS 해석을 수행하는 방법론을 정립하였다. 이와 같은 난류모델에 의한 해석 방법은 DNS 해석을 전제로 한 제한적인 경우뿐만 아니라 전체 유동장의 특성을 파악하

여 주 관심대상이 되는 영역을 규명하는데 활용될 수 있는 장점이 있다. 아울러 온도 variance를 이용하여 온도변화 진폭의 크기를 가늠해 볼 수 있다면 이는 thermal stripping이 발생할 가능성이 높은 지점을 예측할 수 있는 유용한 수단이 될 것이다. 따라서 이러한 유용한 정보를 얻기 위해서는 유동장의 특성을 올바르게 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 제트유동 혹은 합류유동 등에 기존의 다양한 난류모델을 적용하여 그 성능을 평가하고 신뢰성 있는 난류모델을 선정하고자 한다.

2. 본론

2.1 지배방정식과 난류모델

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

운동량방정식과 에너지방정식은 시간평균을 한 결과로 각 식에 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 도출하고자 하는 목적이 있으므로 난류모델은 기존의 모델 중에서 그 신뢰성이 입증된 것을 대상으로 하였다.

우선 난류응력들을 gradient transport 개념을 이용하여 모델링한 $k-\epsilon$ 모델이 간편하고 폭

Table 1. Summary of analysis cases

Case	실험 유체	제트분사방향에 대한 시험편의 위치	온도, K (Hot/Cold)	유속, m/s (Hot/Cold 유속비)	참고문헌
A	Water	수직평판	303 / 293	2.554 (1:1)	Muramatsu ⁽¹⁾
B	Sodium	수직평판	593 / 553	1 (1:1)	Muramatsu ⁽⁴⁾
				1.5 (1:1)	
C	Sodium	수평평판	593 / 553	1 (1:1)	Yamagata et al. ⁽⁷⁾
				1.5 (1:1)	

넓은 응용성이 있는 장점이 있어 적용되었다. 또한 $k-\epsilon$ 모델의 단점을 극복하기 위하여 벽면근처의 유동을 직접 해석하기 위한 여러 형태의 수정작업이 제시되었는데 본 연구에서는 모델의 신뢰성이 다양하게 입증된 Launder와 Sharma⁽⁸⁾의 수정 $k-\epsilon$ 모델(이하 $l-k-\epsilon$)을 사용하였다. FRS는 난류응력과 난류열속에 대한 지배식을 도출하여 이를 모델링하여 사용하는 것으로 모델링이 필요한 난류확산항은 Hanjalic and Launder⁽⁹⁾의 모델을, 압력재분배항은 Rotta⁽¹⁰⁾ 및 Naot 등⁽¹¹⁾의 모델, 그리고 소산항은 Kolmogorov의 모델 등을 사용하여 일반적으로 검증된 모델을 형성하였다. 아울러 본 연구에서는 부력에 따른 압축성 효과가 제대로 반영될 수 있도록 density-weighted average 기법을 적용하여 지배식을 도출하였다.

2.2 수치해석

도입된 난류모델을 포함한 지배방정식들은 CFX⁽¹²⁾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.

과도상태 해석을 위한 시간증분은 10^{-3} sec로 설정하여 실험결과와 상세한 비교가 가능하도록 하였으며 분사된 제트유동이 정상상태에 도달한 약 1 sec의 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 선정된 해석대상은 정립된 해석방법론이 충돌 제트유동 혹은 배관 합류유동 등에 적용될 것임을 감안하여 제트유동을 중심으로 선정하였다. 선정된 제트유동은 Table 1에 보인 바와 같이 물 혹은 액체나트륨이 제트의 분사 방향으로 수직 혹은 수평으로 놓이도록 설정되었다. 아울러

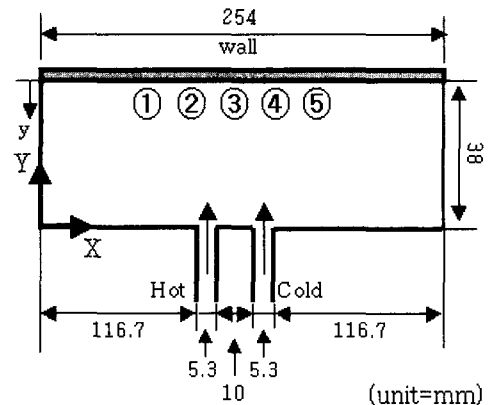


Fig. 1 Geometry of case A

Case B와 C에 대해서는 유속이 1m/s일 때와 1.5m/s일 때의 경우에 대해 해석함으로써 운동량 변화에 따른 유동장의 변화를 알아보려고 하였다. 또한 각 경우별 해석영역은 실험에 의한 자료가 측정된 지점을 포함할 수 있도록 설정되

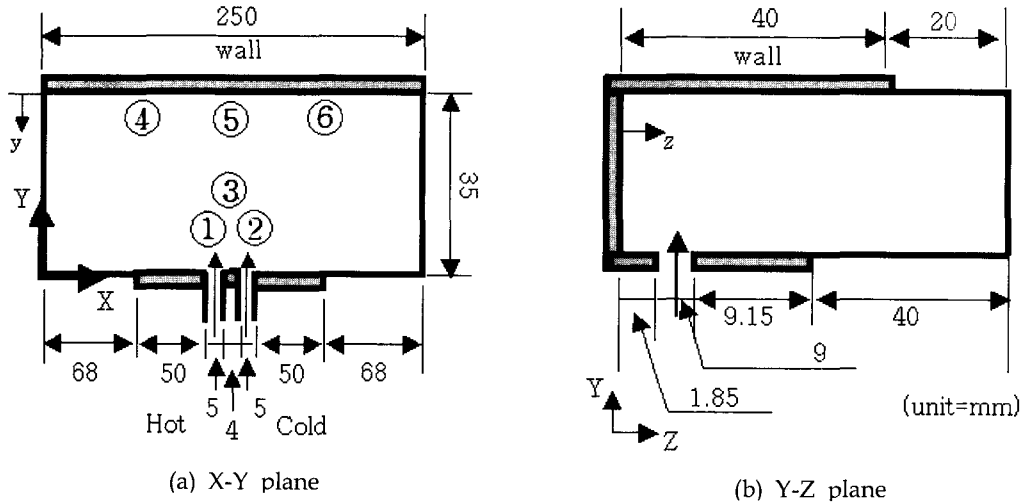


Fig. 2 Geometry of case C

있으며 제트의 분사위치와 시험평면의 위치를 포함한 기하학적 상세가 그림 1과 2에 제시되었다. Case B는 wall의 길이가 250mm, 제트로부터 wall까지의 거리가 35mm이나 그 기하학적 상세는 Case A와 매우 유사하므로 별도의 그림을 생략하였다. Case A와 B는 X와 Y방향으로 51×40의 격자를, Case C 경우에는 X, Y 및 Z 방향으로 62×30×29의 격자를 배치하였다. 각 해석 대상에서 제트의 분사유동은 주어진 유량을 기준으로 속도와 온도가 균일한 조건을 가정하여 분사하였다. 시험편이 위치한 벽면에서는 속도에 대한 점착조건 및 불투과조건을 적용하고 온도에 대하여는 짧은 계산 시간을 고려하여 시험편 외부의 온도가 저온제트의 온도와 동일하다고 가정하고 계산 영역으로부터 시험편을 거쳐 열전달이 이루어지는 조건을 설정하였다. 기타의 공간은 질량의 유출입이 자유로운 점을 감안하여 각 변수에 대하여 Neumann 조건을 적용하는 소위 압력경계조건을 사용하였다. 분사제트의 난류운동에너지는 난류강도를 5%로 설정하여 도출하였으며 이에 따른 소산율은 제트 출구의 수력적 직경을 기준으로 설정하였다.

2.4 해석결과

해석결과는 실험결과와의 비교를 통하여 검증

을 시도하였다. 그러나 thermal stripping을 수반한 유동장에 대한 실험결과가 매우 제한적으로 공개되어 있어 자세한 비교가 용이하지 않았다. 따라서 검증대상에 관한 정량적 및 정성적 보고 내용을 참고하여 가능한 분석을 시도하였다.

2.4.1 수직평판을 가진 유동장의 해석

수직평판을 향하여 분사된 제트에 의해 형성된 유동장을 분석한 Case A와 B는 유사한 기하학적 조건을 가지고 있으나 제트에서 분사되는 유체가 각각 물과 액체나트륨으로 서로 다르며 고온수와 저온수의 온도와 유입속도가 다른 차이점을 보이고 있다.

Case A나 B의 전체적인 유동장은 각각의 제트유동이 분사되어 상부 평판에 충돌한 후에는 평판을 따라 매끄럽게 유출되며 고온과 저온의 제트류 사이에서는 재순환 영역이 형성되었음을 보이고 있다. 속도분포는 Case C와 유사한 특성을 보여 별도의 그림을 제시하지 않았으나 Fig. 7을 참고할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 고온 및 저온 영역은 각각 확대되나 고온 측과 저온 측이 교차되어지는 혼합효과는 제트유동의 대칭성으로 인하여 나타나고 있지 않다.

그림 3에는 Case B에 대하여 난류운동에너지, k의

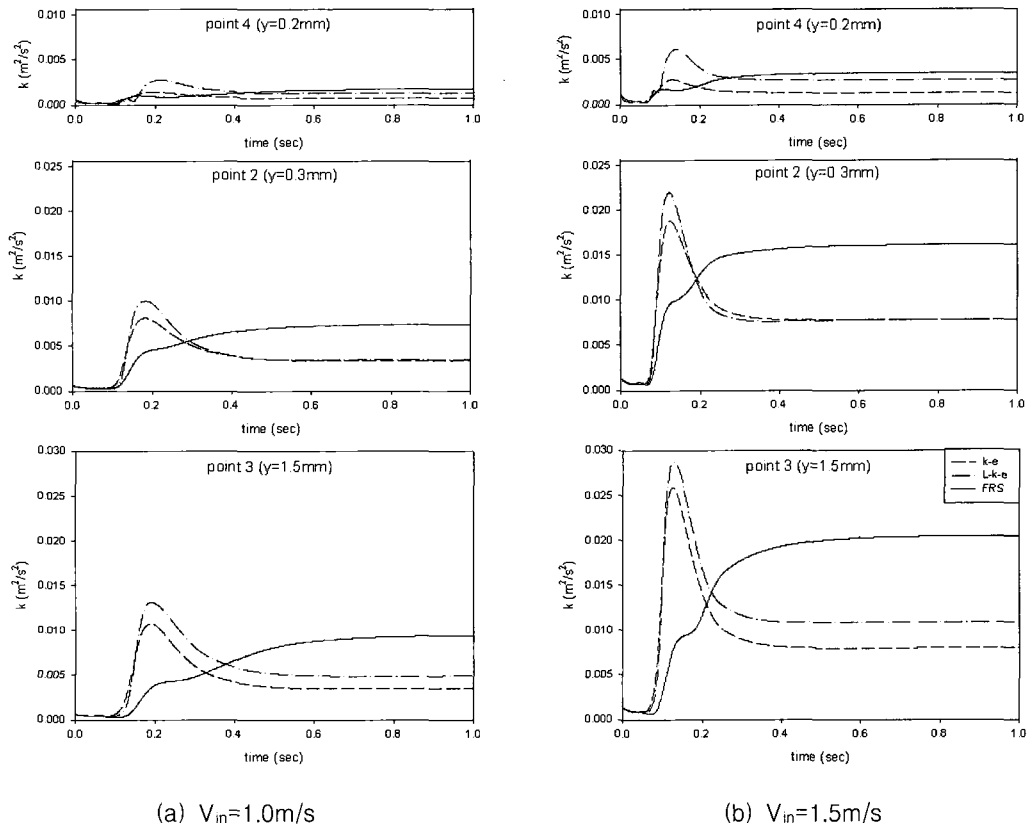


Fig. 3 Variation of turbulent kinetic energy in case B

분포를 제시하였다. 먼저 제트유동의 비교지점은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 여기서 비교점 4는 벽으로부터 0.2mm, 비교점 2와 5는 0.3mm 그리고 비교점 1과 3은 1.5mm가 떨어진 지점에 위치하고 있다. 난류운동에너지 분포는 벽면근처의 비교점 4에서부터 난류 영역으로 향하는 비교점 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. 이것은 FRS는 유동이 정상상태에 진입한 후에도 계속 큰 난류운동에너지가 유지되고 있는 것으로 보아 다른 모델에 비하여 제트 유동장의 활발한 혼합 효과를 반영하는 모델임을 의미하고 있다. 또한 제트의 유속이 그림

3(a)와 (b)에서 보듯이 1.0m/s에서 1.5m/s로 증가하면 전체적인 난류 운동에너지의 분포형태는 유사하나 그 크기는 100% 정도 증가하고 정상상태에 도달하는 시간도 단축되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 같은 조건에서 유속의 증가는 단순한 운동량의 증가를 의미하므로 이것이 혼합 효과를 크게 촉진시킨 결과로 이해된다. Case A의 난류운동에너지의 분포는 Case B와 유사한 결과를 보이고 있어 별도의 그림을 제시하지 않았다.

그림 4에는 Case A의 비교점 1과 3에서 평균 온도변화를 실험결과와 함께 각 모델별로 제시하였다. 여기서 모델에 의한 계산 결과는 평균값을 제시하고 있으나 실험에 의한 결과는 순간 변화량을 제시하고 있어 상응하는 비교를 위하여 실험결과를 최대와 최소 온도를 포함하는 변

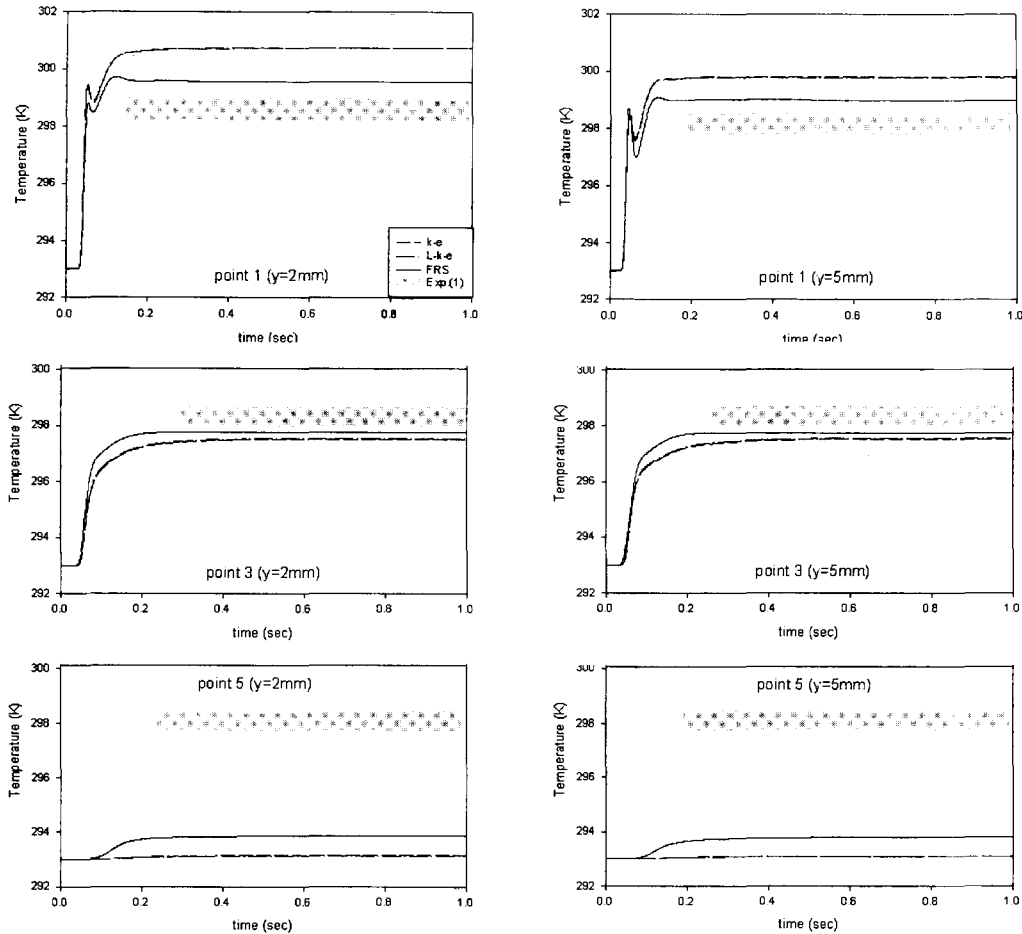


Fig. 4 Variation of temperature in case A

화영역으로 표시하였다. 전반적으로 온도의 변화는 초기의 과도상태를 지나 약 0.2초 이내에 빠르게 정상상태로 안정화되는 경향을 보이고 있으며 모델별로는 FRS에 의한 결과가 가장 실험결과와 근접하고 있는 특징을 보이고 있다. 그러나 고온 영역인 1번 지점에서는 전반적으로 실험결과보다는 큰 온도를 예측하고 저온영역인 5번 지점에서는 낮은 온도를 예측하고 있어 고온 유동과 저온 유동 혼합효과가 미미함을 보이고 있다. 이는 그림 5에 보인 온도의 variance ($\overline{\theta^2}$ or θ_{rms}^2) 값의 비교에서도 중앙부인 3번 지점 외에서는 그 크기가 미미한 것을 보아 온도

의 난류 변화 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 제한적 결과이다. 그러나 $y=2\text{mm}$ 지점에서 난류영역인 $y=5\text{mm}$ 지점으로 이동하면서 온도 variance의 크기가 큰 폭으로 상승하고 있는 물리적 특성은 잘 나타나고 있다.

그림 6에는 Case B에 대하여 구한 평균온도 변화를 제시하였는데 평균온도의 경우 Case A와 유사하게 비교점의 위치와 노즐의 출구 위치의 상대 관계에 따라 온도의 높낮음이 유지되고

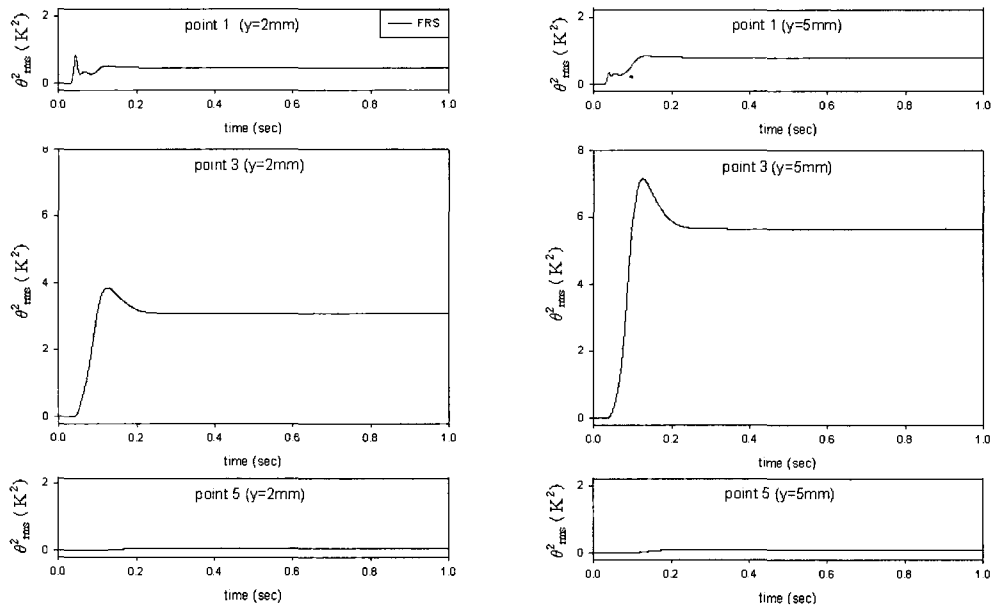


Fig. 5 Variation of temperature variance in case A

있음을 볼 수 있다. Case B의 온도분포에서는 정상상태에 진입하는 시간이 Case A의 약 0.1초에 비하여 약 0.2~0.4초로 다소 지연되고 있는데 이는 노즐에서의 분사 속도가 Case A에서는 2.554m/s 정도인데 비하여 Case B에서는 1.0~1.5m/s 정도로 속도가 작아 운동량이 감소하였으며 큰 열용량이 요구되므로 에너지의 전달이 지연되었기 때문이다. 그러나 같은 Case B에서 도 속도의 증가가 온도 분포의 정상상태 진입을 다소나마 가속화시키는 특성은 그대로 유지되고 있다. 그림을 제시하지는 않았으나 Case B의 FRS에 의한 온도 variance의 비교에서는 Case A와 유사하게 난류영역에서 가장 큰 값의 분포를 보이는 물리적 특성을 올바르게 반영하고 있다. 또한 그림으로 제시하지는 않았으나 제트 유속의 변화에 따라서는 유속비가 1:1.5로 유속이 50% 상승한 경우에 온도 variance의 값도 약 50% 정도 상승한 것으로 관찰되었다. 따라서 이 경우에도 FRS는 Muramatsu⁴¹가 관찰한 바와 같이 온도 동요 진폭은 유속의 증가에 따라 증가한다는 특성을 해석에서 반영하고 있다고 볼 수 있다.

2.4.2 수평평판을 가진 유동장의 해석

Case C는 40K의 온도차가 있는 고온 및 저온의 액체나트륨이 평행 제트로 수직평판을 따라 분사될 때의 온도 분포를 측정된 실험이다.

비교를 위한 Case C의 데이터 비교점들은 그림 2에 나타내었다. 여기서 비교점 3과 5는 수직평판으로부터 z 방향으로 0.06mm, 비교점 1과 6은 0.3mm, 그리고 비교점 2와 4는 1.5mm 떨어진 지점에 위치하고 있다. 그림 7에서는 분사된 제트 유동에 의하여 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. 시간이 경과하며 제트외곽의 와류는 점차 그 중심 위치가 상부 억제판 쪽으로 이동하면서 영역이 넓어져 영향력을 증대시키고 있

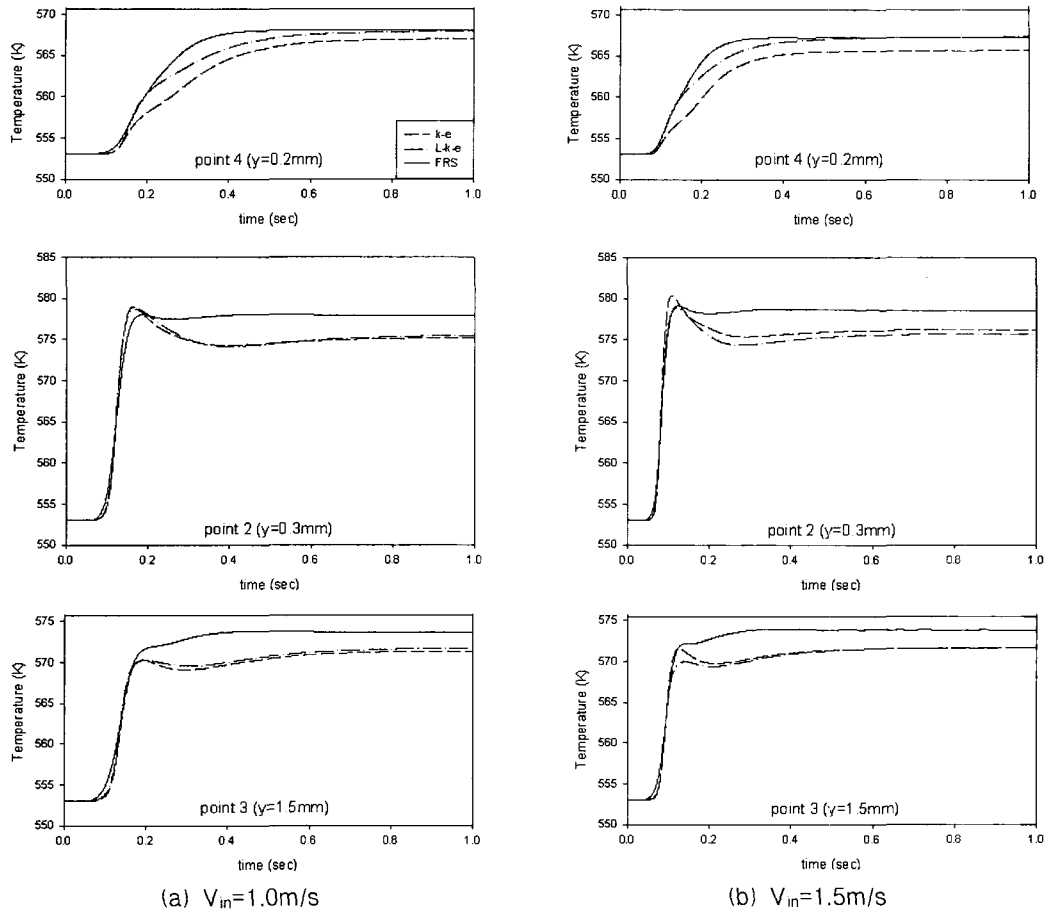
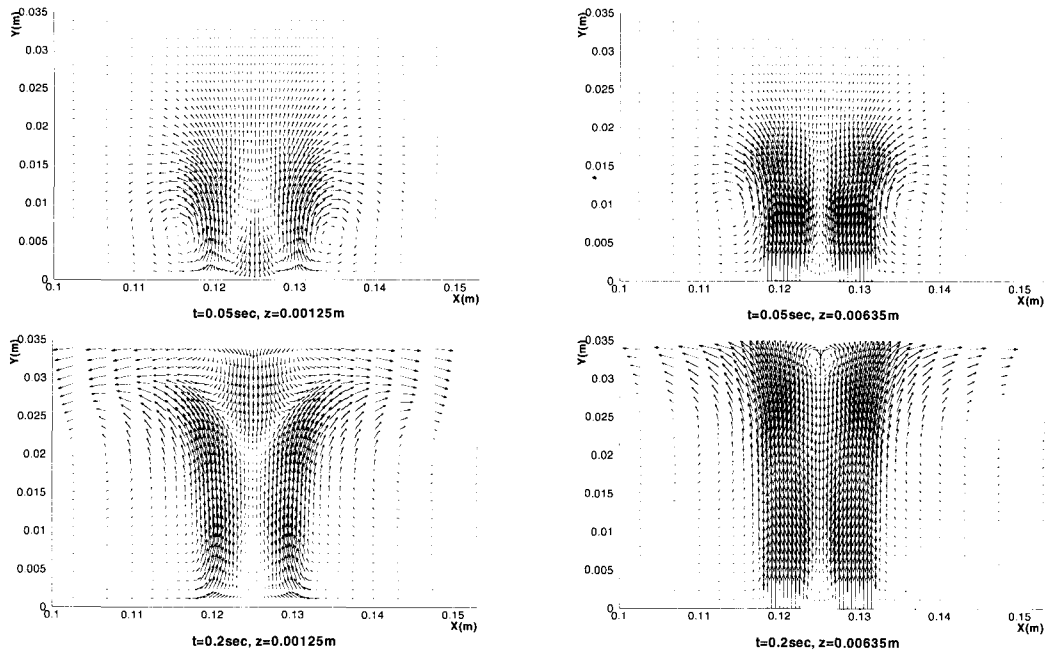


Fig. 6 Variation of temperature in case B

다. 제트에 의한 주 유동은 충분한 시간이 경과한 후에는 상부의 수직평판에 충돌한 후 재발달되는 정상상태의 거동을 보인다. 3-D 해석을 수행한 Case C의 유동패턴은 X-Y평면에서는 대칭의 특성을 보이거나 Z방향의 속도 성분으로 인하여 3차원적 혼합효과를 잘 보이고 있다. 그러나 여기서도 고온 유동과 저온 유동의 교차 움직임은 뚜렷이 관찰되지 않고 있다. 그럼으로 제시하지는 않았으나 유속이 1.0m/s에서 1.5m/s로 변화함에 따라 더 빠른 확산효과를 나타내고 있었다.

그림 8은 각 지점에서의 평균 온도 변화를 제시하고 있다. 전반적으로 각 지점에서의 온도는 분사 제트의 고온 혹은 저온 영역의 위치에 따

라 비례적 분포를 보이고 있다. 저온 영역에 속한 비교점 2와 6의 경우를 제외하고는 실험 결과와 잘 일치된 결과를 제시하고 있다. 저온 측에서 보이는 온도의 차이는 고온 측과 저온 측의 혼합 능력이 아직 크지 못해서 발생하는 것으로 보인다. 그러나 3-D 해석을 수행한 Case C의 경우는 2-D 해석을 수행한 Case A의 결과에 비하여 실험결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 이는 3-D 해석의 경우가 2-D 해석의 경우에 비하여 실험결과에 미치지 못하나 혼합효과의 반영능력이 우수하기 때문으로 분석된다. 모델별 예측성능은 모든 비교점에서 유사한 것으로 나타났다. 유속의 증가는 전체 평균 온도의 분포 특성을 변화시키지 않으나

Fig. 7 Velocity distribution of in case C (FRS with $V_{in}=1.0m/s$)

Case B에서와 그림 7에서 판단하였듯이 정상상태에 도달하는 시간이 운동량의 증가로 감소한 현상을 보이고 있다.

그림 9에는 온도의 variance 분포를 제시하였다. 해석결과는 난류영역에 가까운 비교점 2와 4 지점에서 큰 값을, 중간영역인 비교점 1과 6에서는 작은 값을 보이는 물리적 특성을 반영하고 있으나 벽면 근처인 비교점 3과 5에서는 다소 과도한 예측을 하고 있음을 보이고 있다. 여기서 실험결과는 그 크기가 매우 작아 상호비교가 어려워 보인다. 그러나 실험결과는 정상상태에서 측정된 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. 한편 제트 유속을 증가시킨 경우에는 난류운동에너지와 마찬가지로 온도 variance의 크기가 현저히 증가하며 Case B에서 관찰한 바와 같이 그 증가 크기는 50% 정도임을 확인할 수 있었다.

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 수평평면에 분사되는 제트 유동장에 대한 분석을 수행하였다. 제한적이거나 해석결과의 분석을 통하여 난류유동장은 3-D로 해석되어야 하며 FRS에 의한 해석결과가 속도장과 온도장에 대한 상세 정보를 제공할 수 있으며 다른 모델에 비하여 실험결과와 다소나마 근접하는 신뢰성을 보임을 확인하였다. 그러나 이러한 FRS도 예측능력의 향상을 위해서는 이에 관한 수정모델이 도입되어야 하는 필요성이 있음을 확인하였다. 또한 입구속도 변화를 통하여 운동량을 변화시켰을

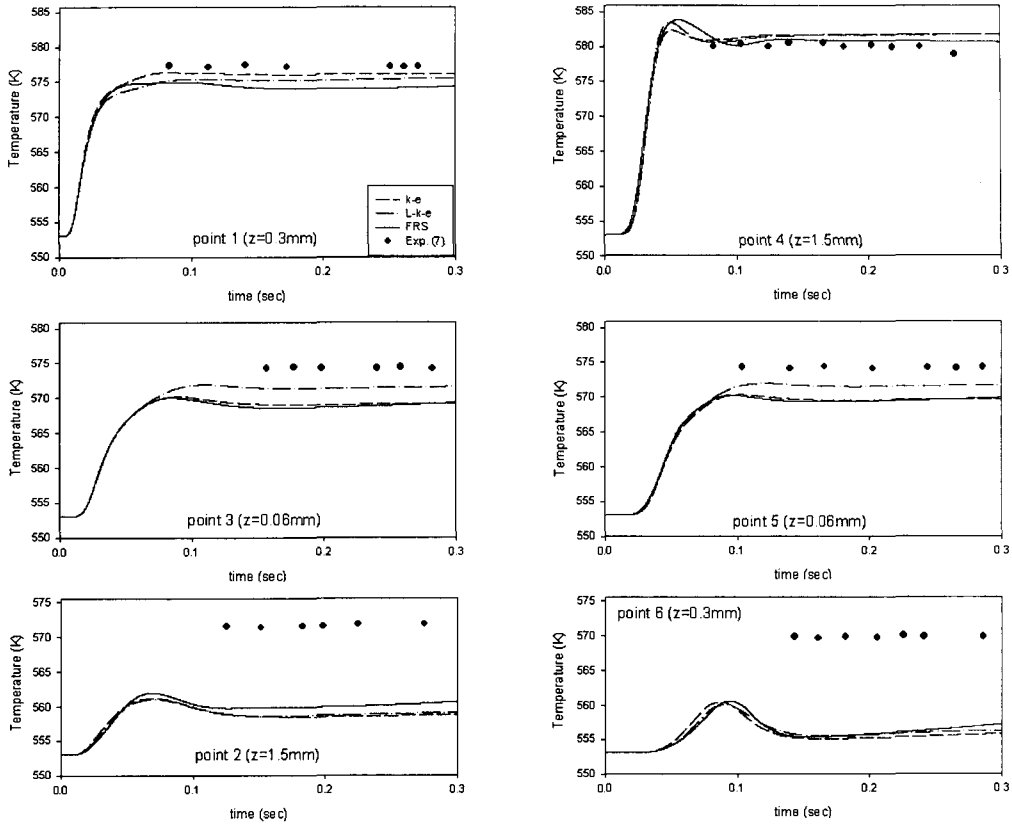


Fig. 8 Variation of temperature in case C (FRS with $V_{in}=1.0m/s$)

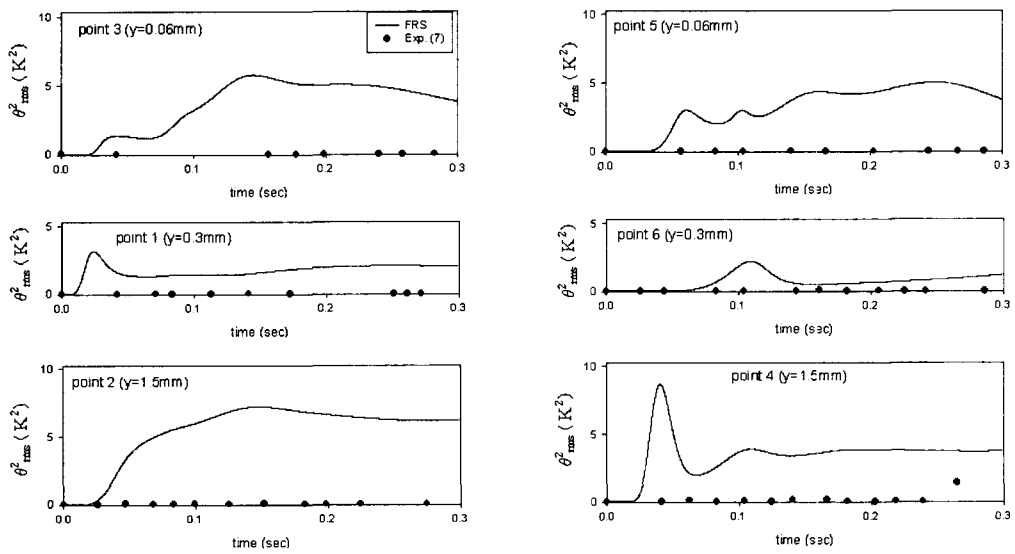


Fig. 9 Variation of temperature variance in case C (FRS with $V_{in}=1.0m/s$)

때 전체 평균 온도의 분포 특성을 변화시키지 않으나 난류운동에너지와 온도 variance의 크기가 속도변화에 따라 선형적으로 변화하며 이에 따라 유동장에 영향을 줌으로써 유동장이 정상 상태에 도달하는 시간이 운동량의 증가로 감소하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2001년 원자력연구개발사업 중 액체금속로 설계기술개발분야의 유체 및 계측제어 계통 설계기술개발과제와 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Muramatsu, T. "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(IV)", PNC ZN9410, Apr., 1992, pp.92-105
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, 1994, pp.81-93
4. Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(X II)", PNC TN9410 98-013, Mar., 1998
5. Murakami, S. and Muramatsu, T., "Numerical Investigation on Turbulence Mixing Characteristics under Thermal Striping Flows", JNC TN9400 99-050, May, 1999
6. Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(X III)", JNC TN9400 99-007, Jan., 1999
7. 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
8. Launder B.E and Sharma, B.T., Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, Letters in Heat and Mass Transfer Vol.1, 1974, pp.131-138
9. Hanjalic, K. and Launder, B.E., "A Reynolds stress Model of Turbulence and it Application to thin shear flows", JFM, Vol. 52, 1972, pp. 609-638
10. Rotta, J.C., "Statistische Theorie nichthomogener Turbulenz", Zeitschrift fur Physik, Vol. 129, 1951, pp. 547-572
11. Naot, D., Shaist, A., and Wolfstein, M., "Two-Point Correlation Model and the Redistribution of Reynolds Stresses", Phys. Fluids, Vol. 16, 1973, pp. 738-743
12. AEA Technology, CFX-F3D Code, Ver.4.2, U.K., 1997