

합류 배관계에서의 비정상 난류유동장 해석에 관한 연구

Analysis of Unsteady Turbulent Flow in Pipes with T-Junction

전원대, 유근중
국립창원대학교
경남 창원시 사림동 9

요 약

Thermal stripping을 수반한 난류유동장에 대한 해석방법론 정립에 필요한 신뢰성 있는 난류모델을 선정하기 위하여 온도변화가 있는 비정상 난류유동장에 $k-\varepsilon$ 모델과 full Reynolds stress(FRS) 모델을 적용하였다. 검증대상으로는 thermal stripping 현상에 의한 열피로 파단을 경험한 T-junction이 있는 합류배관 유동장을 선정하였으며 이 때의 유체는 액체나트륨을 사용하였다. 3-D 해석을 수행하고 유동의 혼합특성과 온도 변화특성을 분석한 결과 비정상 난류유동장의 물리적 특성을 올바르게 예측할 수 있었으며 FRS가 유동장의 확산효과를 빠르게 반영하는 예측성능을 보였다. 그러나 경계면 부근을 비롯한 유동장내에서의 열전달 특성 분석의 정확성을 제고하기 위해서는 이를 위한 수정모델의 도입이 요구된다.

ABSTRACT

The suitable turbulence model is found to be required in the course of establishing a proper analysis methodology for thermal stripping phenomena. Two different turbulence models of $k-\varepsilon$ model and Full Reynolds Stress(FRS) model, are applied to analyze unsteady turbulent flows with temperature variation. Test case is cross jet sodium flow in pipe with T-junction. Analysis yields the conclusion that 3-D computation with turbulence model is generally able to predict physical characteristics of flow. FRS predicts fast diffusion transport effect. However, modified modeling for near wall effect is required to improve its heat transfer characteristic analysis.

1. 서 론

고온과 저온의 온도변화가 현저하게 발생하는 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 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 변화 크기인 것으로 규명되고 있다. 온도요동변화의 주파수가 비교적 작은 경우에는 인접한 구조재에 열전달 특성이 전달될 수 있는 충분한 시간이 제공되므로 이러한 저주파수의 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 순간변수의 시간에 대한 정보를 정확히 구해내야 한다. 그러나 일반적인 난류모델에 의한 지배식은 평균개념을 적용하여 얻어지므로 원천적으로 순간변수의 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 DNS 해석을 수행하는 방법론을 정립하였다. 이와 같은 난류모델에 의한 해석 방법은 DNS 해석을 전제로 한 제한적인 경우뿐만 아니라 전체 유동장의 특성을 파악하여 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 난류모델을 이용한 해석이 필요하다.

전원대 등⁽¹¹⁾ 과 유근종 등⁽¹²⁾은 thermal stripping 현상이 발생할 가능성이 높은 영역에서 관찰되는 제트유동에 기존의 다양한 난류모델을 적용하여 그 성능을 평가하였다. 본 연구에서는 원자로에서 쉽게 확인할 수 있는 배관이 합류하는 유동장에 난류모델을 적용하여 신뢰성 있는 난류모델을 선정하기 위한 근거로 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식과 난류모델

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

운동량방정식과 에너지방정식은 시간평균을 하여 도출되는데 이 결과로 각 식에 추가적으로 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 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 넓

은 응용성이 있는 장점이 있어 적용되었다. FRS는 난류응력과 난류열속에 대한 지배식을 도출하여 이를 모델링하여 사용하는 것으로 모델링이 필5한 난류확산항은 Hanjalic and Launder⁽¹³⁾의 모델을, 압력재분배항은 Rotta⁽¹⁴⁾ 및 Naot 등⁽¹⁴⁾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 수치 해석

도입된 난류모델을 포함한 지배방정식들은 CFX⁽¹⁶⁾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 실험결과와 상세한 비교가 가능하도록 하였으며 합류 초기의 거동을 집중적으로 분석하기 위하여 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 해석대상

본 연구에서 난류모델의 성능 검증용으로 선정한 해석대상은 T-junction으로 구성된 합류배관에서 발생하는 교차분류(cross jet)이다. 이는 프랑스의 고속로 PHOENIX에서 발생한 thermal

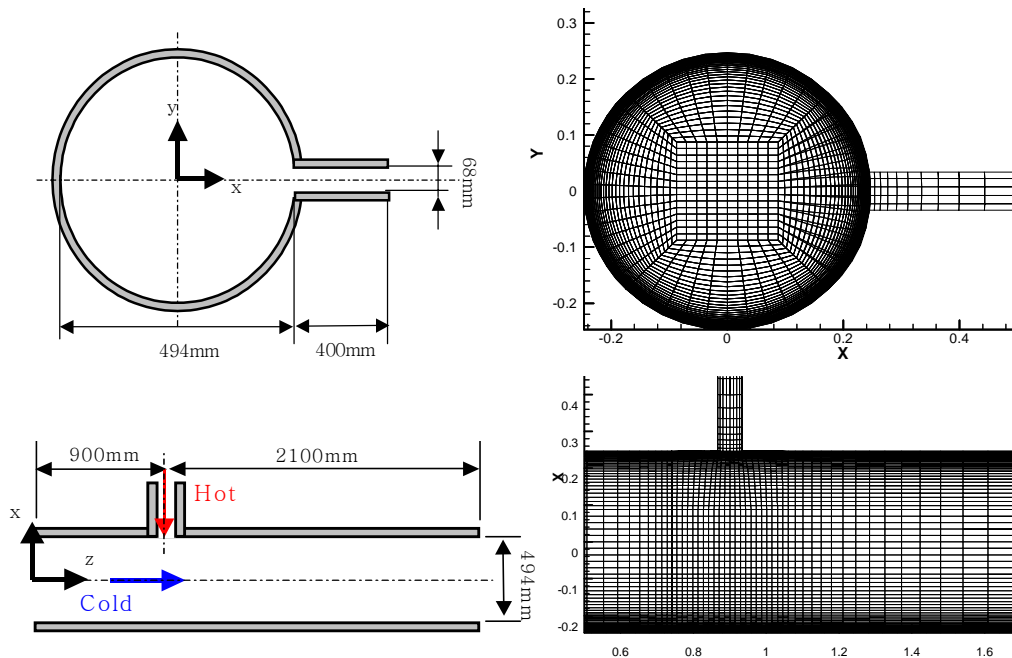
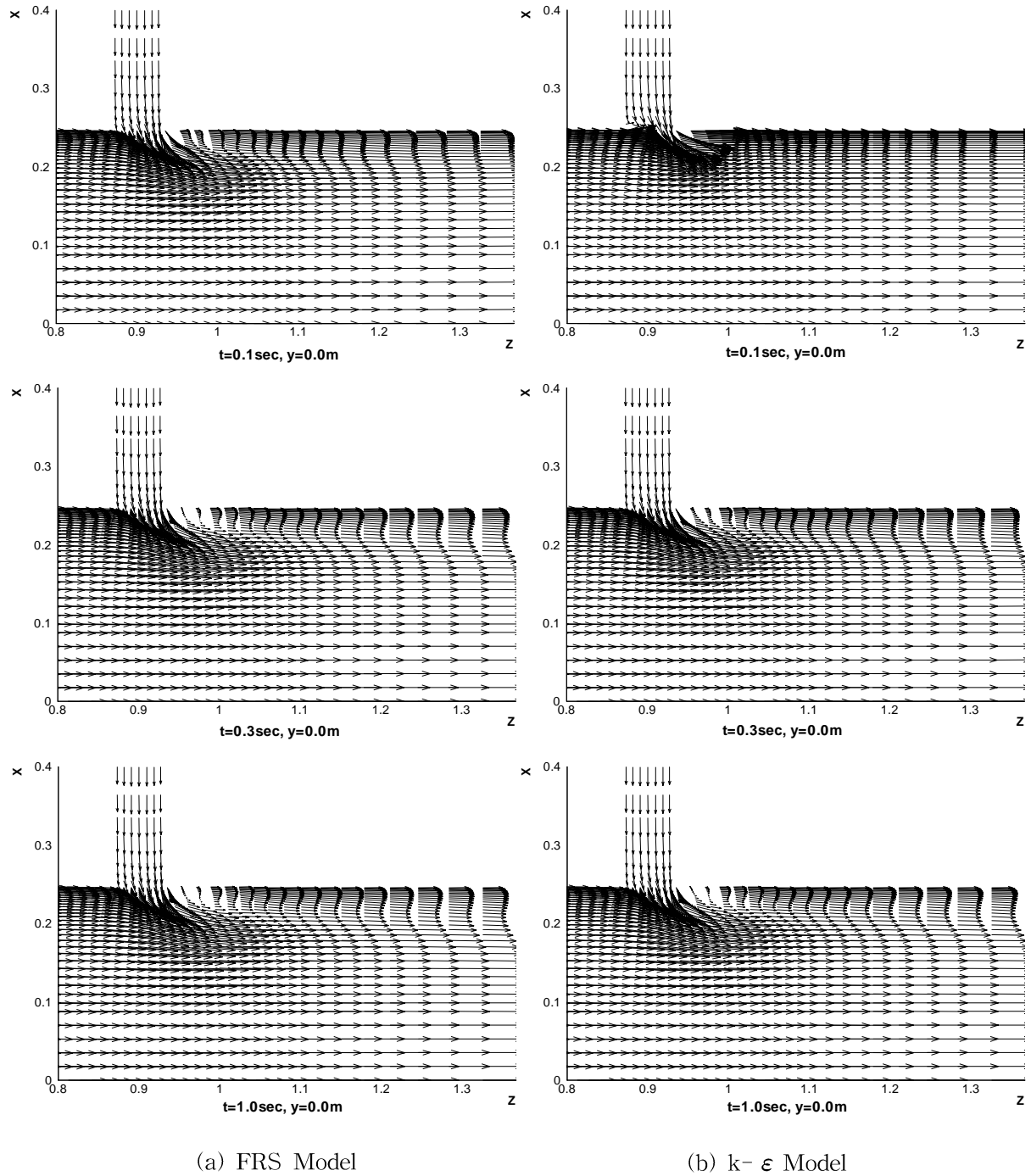


Fig 1. Geometry and Grid System of Cross Jet

stripping에 의한 열피로가 원인이 되어 발생한 냉각재 누출사고 지점을 포함하여 모사하기 위한 것으로 이러한 기하학적인 형상은 국제원자력기구가 thermal stripping 관련 현상의 해석 시에 참고하도록 선정된 bench-mark⁽⁴⁾ 대상이다.

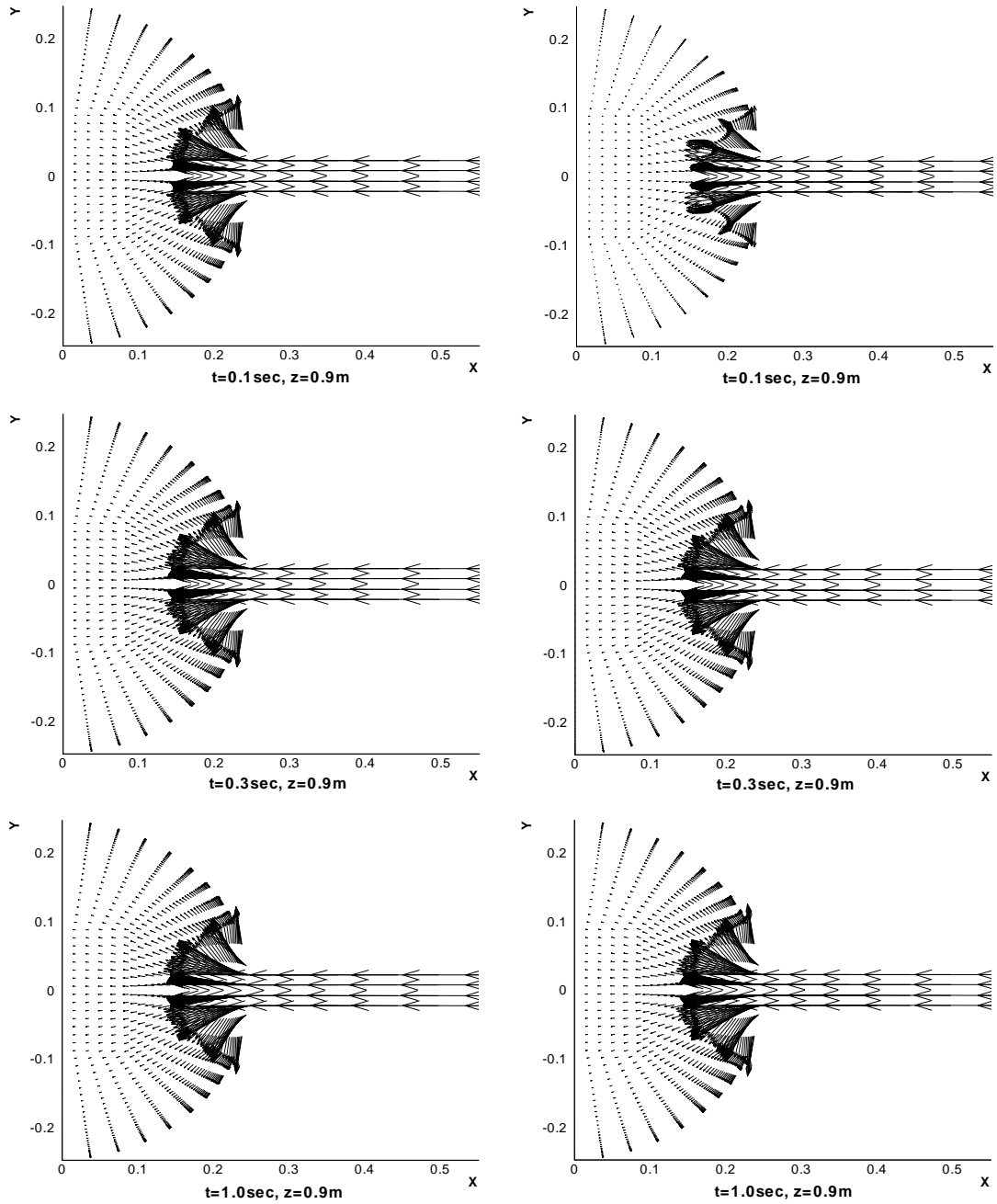


(a) FRS Model

(b) k-ε Model

Fig 2. Velocity Vectors on X-Z Plane

선정된 배관합류 유동은 주관과 지관을 통하여 주입된 액체나트륨이 수직 방향으로 합류하고 있다. 주관을 흐르는 유체는 유속이 4.8m/s이며 지관을 통하여 합류하는 유체의 유속은 2.3m/s이다. 한편 주관과 지관에서의 유체 온도는 각각 613K와 703K로 90K의 온도차를 유지하고 합류하게 된다. 해석영역은 냉각재누출사고가 발생한 용접선이 위치한 합류지점 하단 0.16m 지점을 충분



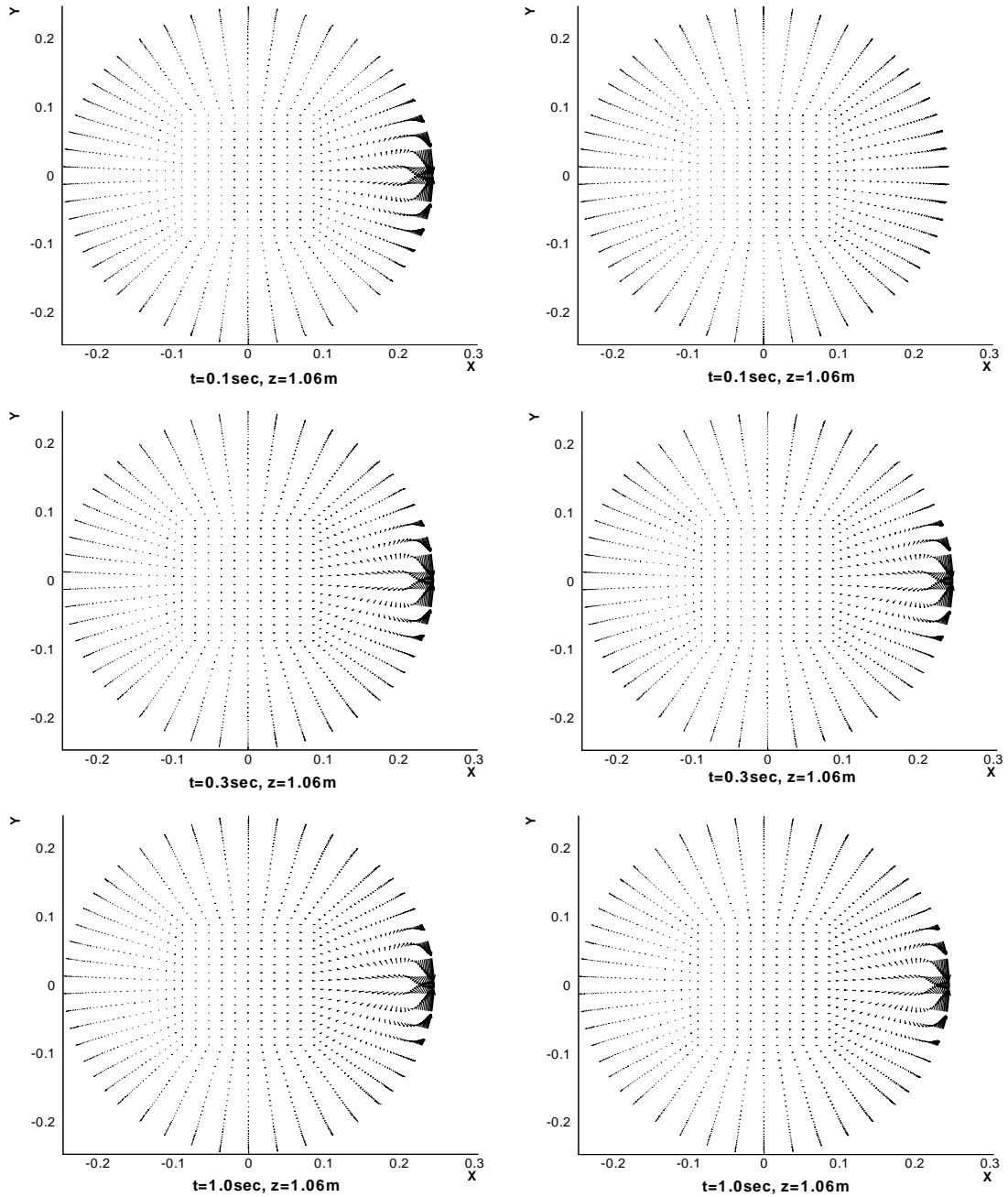
(a) FRS Model

(b) k-ε Model

Fig 3. Velocity Vectors on X-Y Plane

히 포함할 수 있도록 설정되었으며 배관의 합류지점을 포함한 기하학적 상세가 Fig. 1에 제시되었다. 격자계는 x, y 및 z 방향으로 $35 \times 38 \times 45$ 의 격자를 배치하였다.

해석영역의 입구조건은 상단으로부터 발달한 유동장의 특성을 반영하여야 하나 여기서는 모델간의 성능을 우선 평가하는 것이 주요 관점이므로 균일 속도장과 이에 따른 균일 난류장으로 설



(a) FRS Model

(b) $k-\epsilon$ Model

Fig 3. (Continue) Velocity Vectors on X-Y Plane

정하였다. 배관의 벽면에서는 속도에 대한 점착조건 및 불투과조건을 적용하고 온도에 대하여는 단열 조건을 설정하였다. 배관의 출구에서는 질량의 유출을 감안하여 각 변수에 대하여 Neumann 조건을 적용하였다.

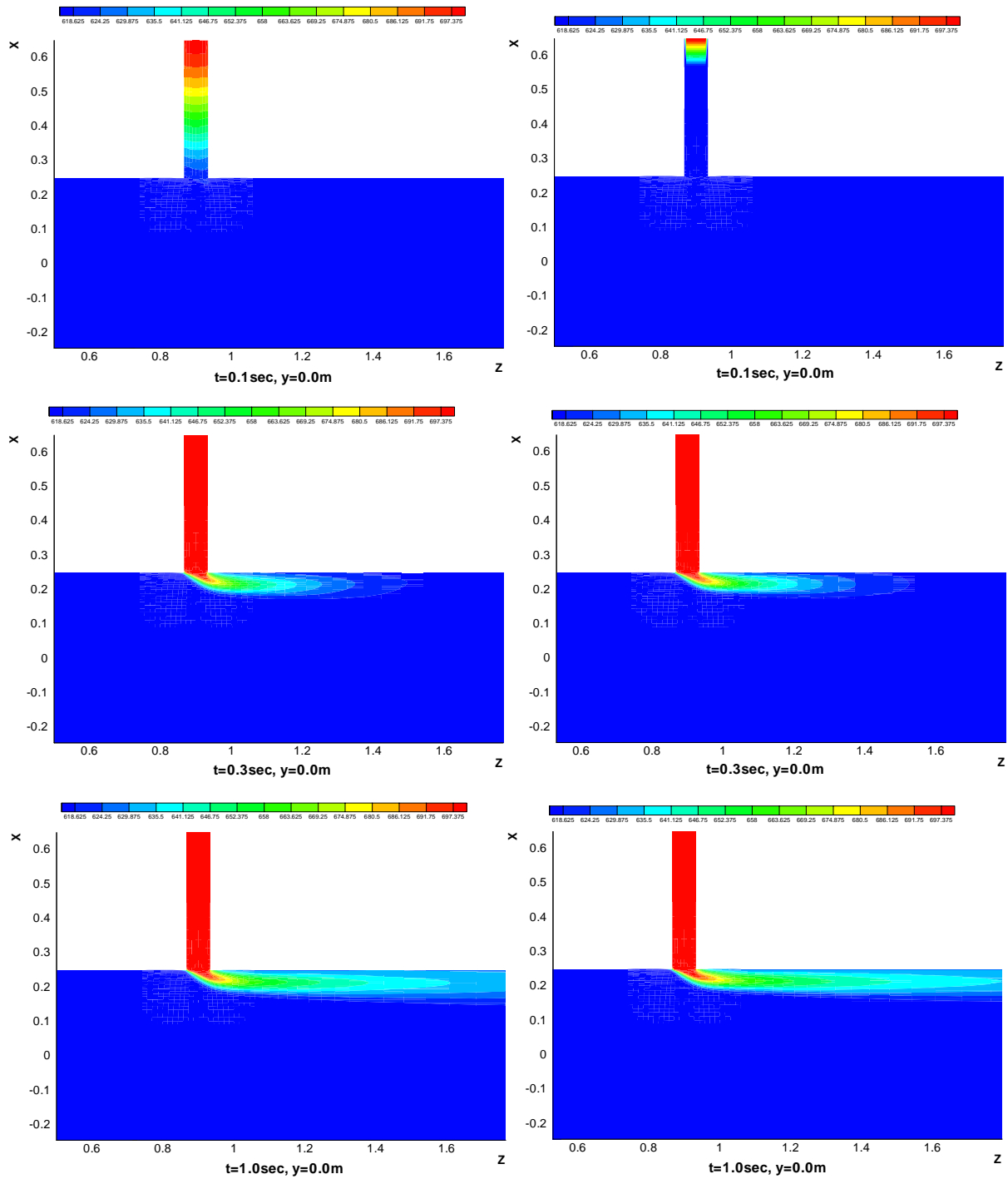
2.4 해석결과

해석결과는 실험결과와의 비교를 통하여 검증되어야 하나 참고 대상이 실제 사고의 발생으로 인하여 선정된 만큼 사고 시점의 관련 자료는 확보되어 있으나 사고에 이르기까지의 열유체적 거동에 관한 상세 자료는 결여되어 있어 해석 결과를 비교 검토하는데는 제한적인 접근을 할 수밖에 없다. 따라서 검증대상에 관한 정량적 및 정성적 보고 내용 및 관련 자료⁽⁴⁾를 참고하여 가능한 분석을 시도하였다.

지관을 통하여 유입된 고온의 액체나트륨이 주관을 흐르는 액체나트륨과 합류하면서 형성된 속도분포를 Fig. 2에 나타내었다. 지관을 통하여 유입된 유체는 주관 내로 분사되어 중앙부로 침투하고 있으나 주관 내 유체의 큰 운동량으로 인하여 하류 쪽으로 그 유동 방향이 전환되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 방향 전환의 영향으로 합류 지점 부근 하류에서는 작으나마 재순환 영역의 발생 가능성이 있음을 관찰할 수 있다. 시간이 경과하면서 벽면으로부터 재발달하는 경계층은 이러한 가능성을 확인해 주는 것이다. FRS는 $k-\epsilon$ 모델에 비하여 이러한 경계층의 재발달이 초기부터 활발하게 이루어지고 있어 합류에 의한 확산효과가 빠르게 전달되고 있음을 보이고 있다. 아울러 Fig. 3에는 합류 위치와 합류 지점 하류에 있는 용접선 위치에서 주관 단면에서의 속도분포를 제시하였다. 여기서는 지관을 통한 교차분류의 침투 형태를 관찰할 수 있는데 단면 전체로 고르게 퍼져 나가는 모습을 볼 수 있다. 여기서도 합류 초기인 0.1초에서 FRS가 $k-\epsilon$ 모델에 비하여 더 고르게 퍼져 나가는 특성을 보이고 있으나 시간이 경과하면 두 모델의 예측결과가 동일하게 나타나고 있다. 이러한 특성은 용접선 위치인 합류지점 하류에서 더욱 뚜렷이 나타나는데 이를 통하여 FRS가 모든 방향의 확산 효과를 빠르게 반영하고 있음을 알 수 있다.

Figure 4에는 지관을 통하여 유입된 고온 액체나트륨으로 인한 주관 내부의 평균온도 분포를 제시하였다. 유입된 고온 유체는 열전달을 통하여 주관을 흐르는 유체의 온도를 상승시키는데 이의 직접적인 영향을 받는 영역은 Figs. 2와 3에서 보인 바와 같은 교차분류의 확산 영역과 일치하고 있다. 이 영역은 주관 쪽의 큰 운동량으로 인하여 교차분류가 넓게 확산되지 못하고 있기 때문에 주관의 상부 쪽으로 치우쳐 있다. 그러나 시간이 흐르면서 이 영역은 서서히 확장되고 있다. 시간이 경과하면서 고온의 제트 중심영역은 $k-\epsilon$ 모델에서 더 길게 예측되고 있는데 이는 속도 분포에서 관찰하였던 확산 효과와 일치하는 것이다. 즉, FRS는 빠른 확산효과로 인하여 열전달의 축진을 예측하였기 때문에 이러한 고온의 제트 중심영역이 빠르게 소멸하고 대신에 고온 유체의 영향을 받은 영역이 확장되고 있는 결과를 보이고 있는 것이다. 합류지점과 합류지점 하류에 있는 용접선 위치에서의 주관 단면에 분포한 평균온도 분포를 보인 Fig. 5에서도 이러한 특성은 동일하게 보이고 있다.

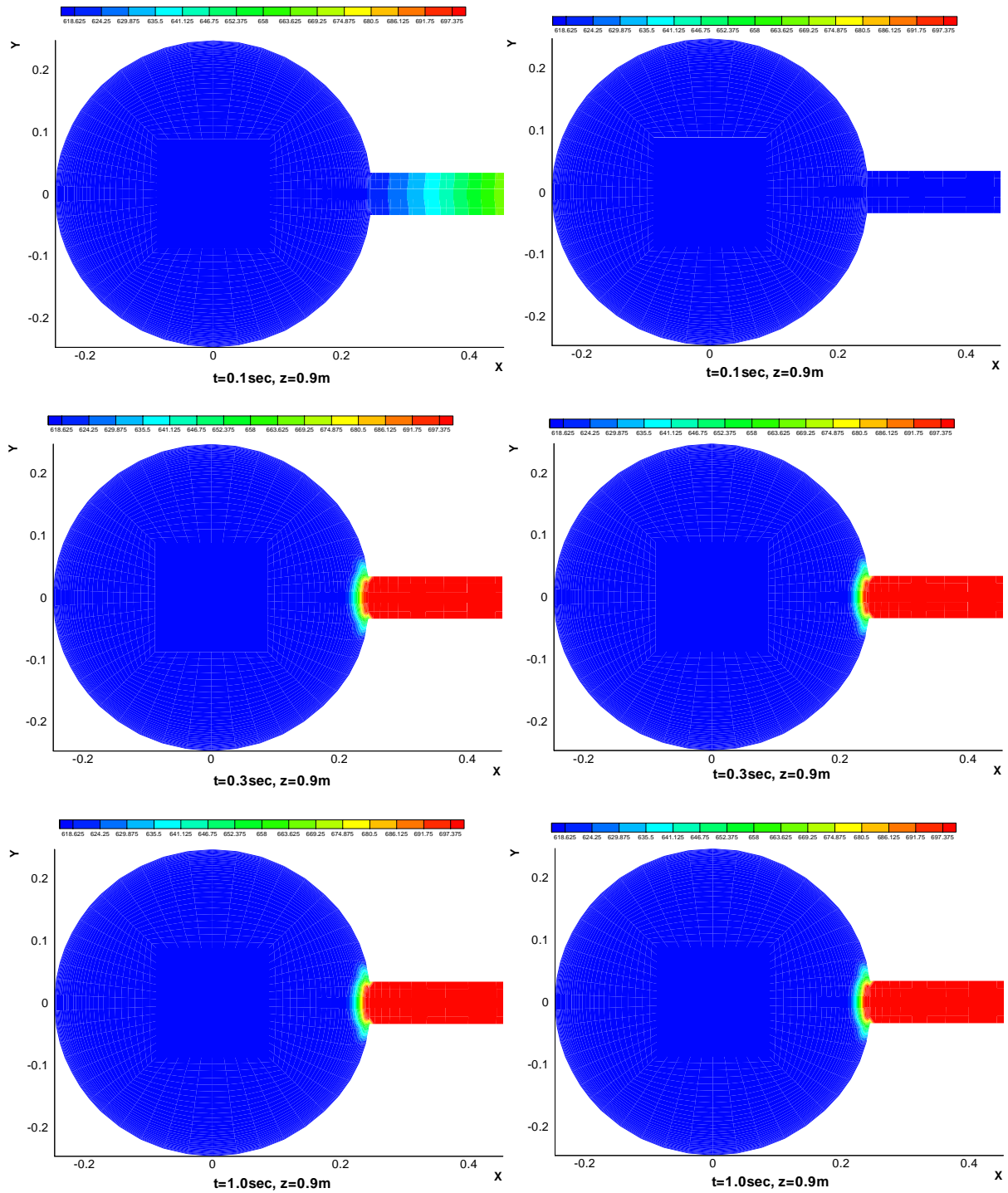
온도의 요동성분 크기를 예측할 수 있는 온도 variance($\overline{\theta'^2}$)의 분포는 Fig. 6에 나타내었다. 비교지점은 용접선이 위치한 곳으로 주배관의 상부 및 좌우의 측면을 포함한 3지점을 선정하였다. 이곳은 실제 파단이 일어난 곳으로 큰 진폭의 온도변화가 작은 주파수의 특성을 보이는 곳으로 추정되고 있다. 고온의 액체나트륨이 유입되는 주관 상부는 시간이 경과하여 0.4초 정도 지나면 약 $1.5K^2$ 정도의 온도 요동강도를 거의 일정하게 유지하고 있다. 반면에 고온 유체의 유입 방향과



(a) FRS Model

(b) $k-\epsilon$ Model

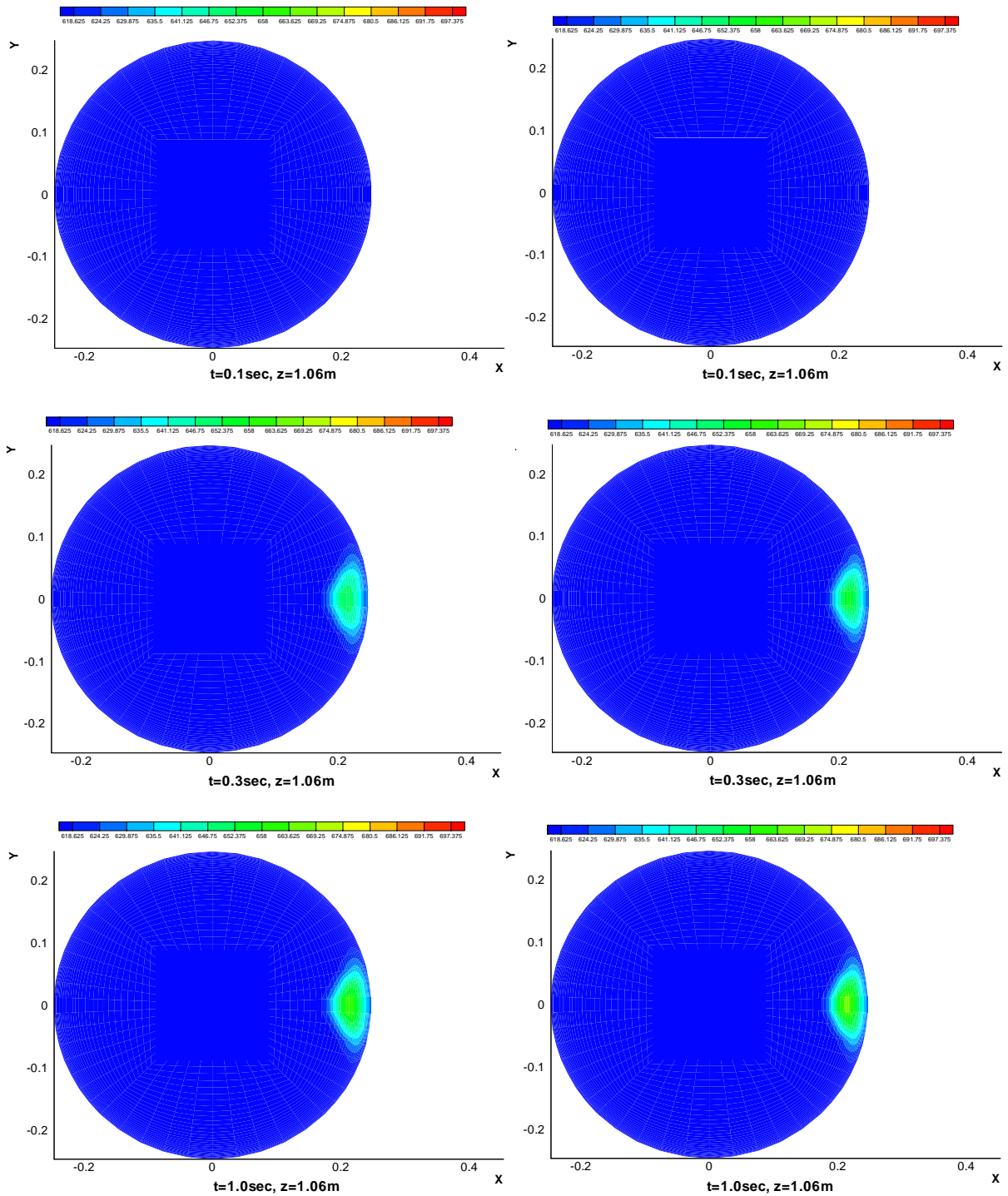
Fig 4. Contour of Temperature on X-Z Plane



(a) FRS Model

(b) $k-\epsilon$ Model

Fig 5. Contour of Temperature on X-Y Plane



(a) FRS Model

(b) $k-\epsilon$ Model

Fig 5. (Continue) Contour of Temperature on X-Y Plane

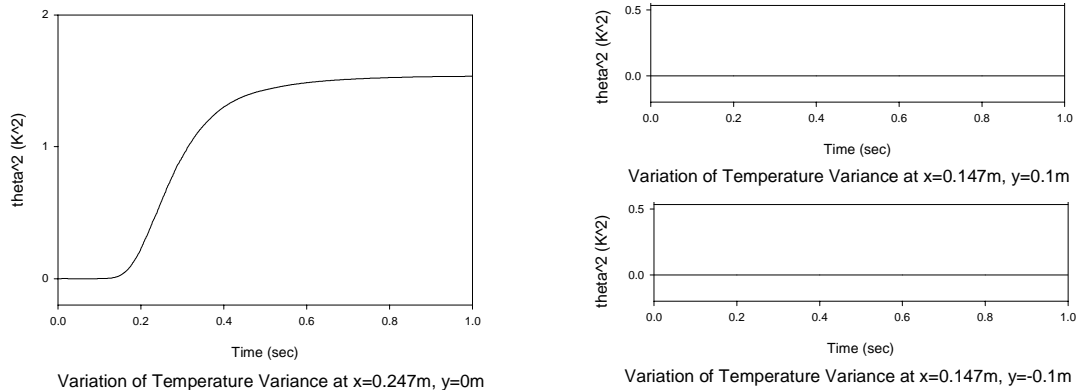


Fig 6. Variation of Temperature Variance at z=1.06m in Cross Jet (FRS)

떨어져 있는 좌우의 측면은 온도 요동강도가 미미하여 큰 온도변화 진폭은 주관의 상부에 집중하고 있음을 알 수 있다. 이는 이곳이 thermal stripping이 발생할 수 있는 가능성이 가장 높은 지점임을 나타내는 것이다.

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 유동장⁽¹¹⁻¹²⁾과 합류배관에서의 교차분류 유동에 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.

후 기

본 연구는 2000년 원자력연구개발사업 중 액체금속로 설계기술개발분야의 유체 및 계측제어계통설계 기술개발과제의 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., "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. 전원대, 유근중, 심윤섭, "온도변화가 있는 비정상 난류유동장 해석을 위한 난류모델의 성능비교에 관한 연구", 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회 요약집, pp.161
12. 유근중, 전원대, 김수태, "운동량변화가 온도변화가 있는 비정상 난류유동장에 미치는 영향", 창원대학교 산업기술연구소 논문집 제15권, 2001, pp.173-197
13. Hanjalic, K. and Launder, B.E., "A Reynolds stress Model of Turbulence and its Application to thin shear flows", JFM, Vol. 52, 1972, pp. 609-638
14. Rotta, J.C., "Statistische Theorie nichthomogener Turbulenz", Zeitschrift fur Physik, Vol. 129, 1951, pp. 547-572
15. 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
16. AEA Technology, CFX-F3D Code, Ver.4.2, U.K., 1997