

평행 3중 분류에 의한 비정상 난류 유동장 해석

Analysis of Unsteady Turbulent Parallel Triple-Jet Flow  
with Temperature Difference

정지훈, 유근종  
국립창원대학교  
경남 창원시 사림동 9

요 약

Thermal stripping 현상을 수반한 비정상 난류유동장을 해석하기 위해 LES 모델을 사용하였다. 검증대상은 평행 3중 분류로 선정하였으며, LES 모델 중 Smagorinsky-Lilly 모델을 사용하여, 3-D로 해석을 수행하였다. LES는 온도요동의 크기와 주파수의 평가에 영향을 미치는 난류변수들의 시간에 대한 정보를 도출하였다. 분석결과 LES 모델이 실험 결과에 비해 혼합효과를 저평가하고 있음을 알 수 있었다. 차후 세밀한 격자계로 계산을 수행할 것이며 또한 입구측의 난류강도를 조절해서 그 영향을 살펴볼 예정이다.

Abstract

LES is applied to analyze unsteady turbulent triple-jet water flows which are commonly found in thermal stripping phenomena. 3-D computations are performed with LES of Smagorinsky-Lilly SGS model. The LES successfully produces time history of turbulence variables which could be used to evaluate magnitude and frequency of fluctuating temperature. Comparisons of the LES results with experimental data show that the LES underestimates mixing activity in flow field. Further study is required to find fine grid system effect and inlet turbulence intensity effect.

1. 서 론

유체의 온도가 빠르고 주기적으로 변화할 때 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위해서

는 상세한 열전달 해석이 필요하다. 이러한 열전달 현상은 결국 구조물에 열적인 피로를 야기시키게 되는데 이를 thermal stripping 현상이라고 한다. 즉 유동장에서 발생하는 온도의 요동변화특성이 구조재로 전달되는 열전달의 크기를 결정하게 되는데 그 중요한 영향인자는 온도요동변화의 주파수와 그 변화의 크기인 것으로 알려져 있다.

난류 유동장의 해석에서 난류유동변수의 변화를 설명하는 주파수의 크기를 알아내기 위해서는 순간변수의 시간에 대한 정보를 정확히 구해야 한다. 하지만 일반적인 난류모델에서는 평균개념을 적용하므로 순간변수의 시간에 대한 정보를 얻을 수 없다. 이를 얻기 위해서는 DNS(Direct Numerical Simulation) 등을 이용한 해석이 요구되는데 이 역시 작은 난류척도에 버금가는 격자계를 형성하여 수행하기 때문에 긴 계산시간을 필요로 한다. 따라서 Muramatsu 등<sup>1-3)</sup>과 같은 연구자는 난류모델에 의한 해석을 통하여 온도요동진폭이 큰 영역을 먼저 알아내고 이 영역에 대해서 제한적으로 DNS 해석을 수행하는 quasi-DNS를 이용한 해석방법론을 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. 반면에 LES는 일정 격자 크기 이하에서만 난류 모델링 기법을 적용하고 대부분의 격자에 대해서는 직접해석을 함으로써 난류변수의 시간에 따른 정보를 얻을 수 있는 특징이 있다. 따라서 DNS에 비해 훨씬 적은 격자 수를 가지고 보다 빠르게 해석 결과를 얻을 수 있다.

Thermal stripping 현상이 발생할 가능성이 있는 유동장의 해석에 몇몇 연구자들이 참여하고 있다. 최근 Yoo and Jeon<sup>4)</sup>은 thermal stripping 현상이 발생할 가능성이 높은 영역에서 관찰되는 제트유동에 기존의 다양한 난류모델과 LES 기법을 적용하여 그 성능을 평가하였다. 또한 Jung and Yoo<sup>5)</sup>는 LES 기법을 적용해 평행 3중 분류 유동장 해석을 수행하여 SGS 모델 및 난류강도, 격자 수에 따른 영향에 대해 평가하였다.

본 연구에서는 지난 연구<sup>5)</sup>에 이어 LES 기법 중 Smagorinsky-Lilly 모델<sup>6)</sup>을 이용하여 thermal stripping 현상이 발생할 가능성이 있는 유동장의 하나인 평행 3중 분류에서의 난류 유동장을 해석하였고 유동의 혼합특성 및 온도변화특성을 Kimura<sup>7)</sup> 등이 수행한 실험과 비교하였다.

## 2. 해석방법

본 연구에서는 상용코드인 STAR-CD<sup>8)</sup>를 이용하여 해석을 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-Nicholson 이산화법을 사용하였다. 해석 기법은 PISO기법을 사용하였다.

LES의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식을 필터링해서 얻어진다. 여기에는 작은 난

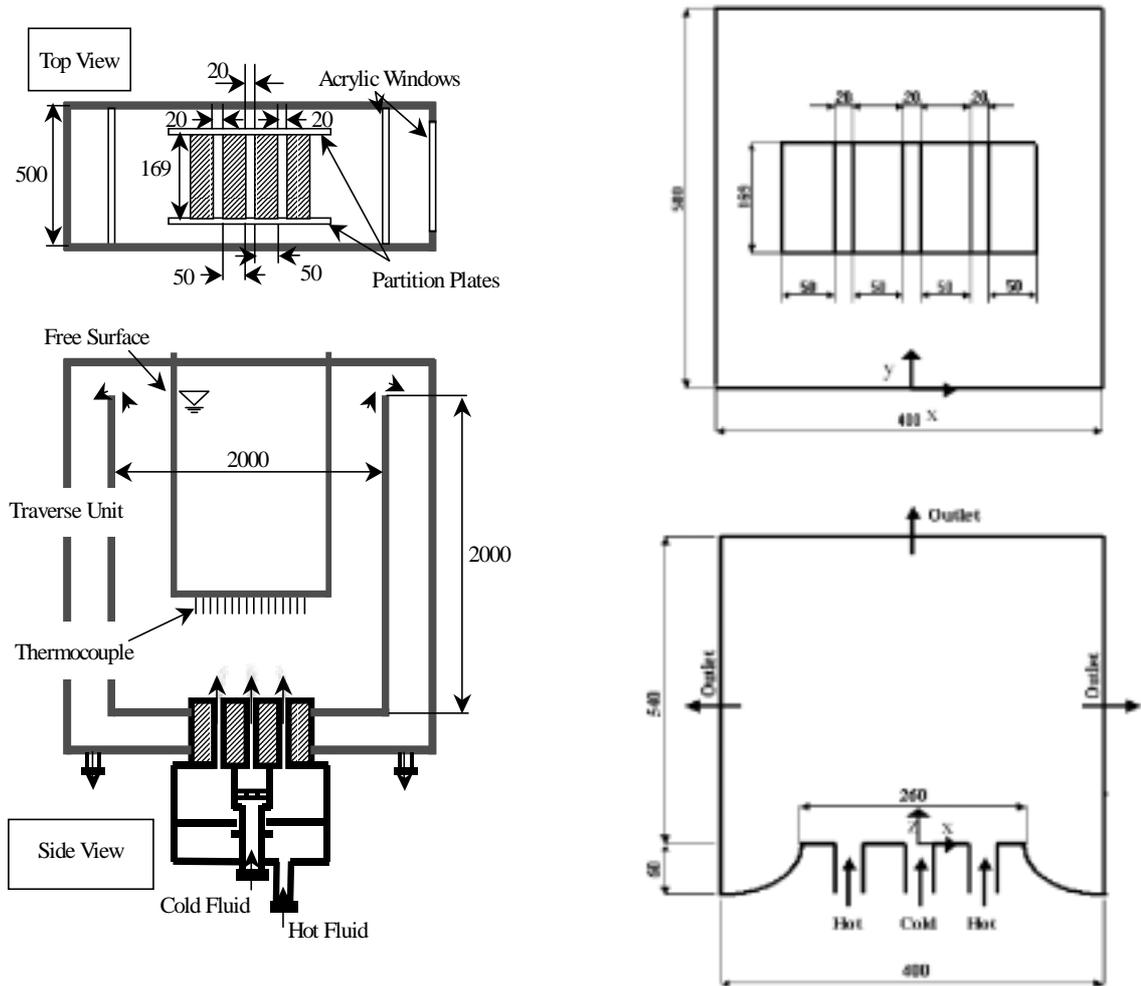


Fig. 1 Schematics of Test Case and Computational Domain

류척도의 해석을 위해 SGS에 대하여 모델화된 난류응력항이 포함되어 있다. 본 연구에서는 Smagorinsky 모델<sup>9)</sup>을 보완한 Smagorinsky-Lilly 모델<sup>6)</sup>을 사용하여 해석을 수행하였다. 이는 벽면에서부터의 거리를 감안해 필터링 폭을 조절해 줌으로써 벽 근처에서의 난류효과를 더 정확하게 예측할 수 있다.

과도상태를 해석하기 위한 시간증분은 0.001초로 하였고, 실험 결과<sup>7)</sup>와 충분한 비교가 가능하도록 계산시간을 20.48초로 설정하였다. 수렴조건은 매 시간 단계에서 질량의 수렴조건으로 상대오차 0.1%로 하였으며, 운동량의 수렴조건으로 상대오차 1%로 하였고, 에너지 방정식 또한 같은 수렴조건을 만족하였다.

본 연구에서의 해석대상은 평행 3중 분류(parallel triple jet flow)이다. 해석대상의 기하학적 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 격자계는 x, y 및 z 방향으로 92×56×28개의 격자를 배치하였고 제트의 분사지점 및 벽면에 집중시켰다. 해석에 사용된 유체는 물이며, 중앙

부에서는 26°C의 저온제트가, 그리고 그 양쪽으로 31°C의 고온제트가 각각 0.5m/s의 속도로 분사되고 있다. 초기의 온도는 고온제트와 저온제트의 평균온도인 28.5°C로 설정하였고 입구에서의 난류강도는 5%로 설정하였다. 또한, 좌우 경계면과 후부쪽 경계면은 출구 경계조건을 적용하였고 그 외의 벽면은 점착조건을 주었으며 단열조건으로 처리하였다. 경계조건을 요약해보면 Table. 1과 같다.

### 3. 해석결과

LES 기법으로 평행 3중 분류 유동장을 해석하였다. SGS 모델 및 난류강도, 그리고 격자 수에 따른 영향은 지난 연구<sup>5)</sup>에서 살펴보았고 이번 연구에서는 SGS 모델 중의 하나인 Smagorinsky 모델<sup>9)</sup>을 보완한 Smagorinsky-Lilly 모델<sup>6)</sup>을 사용하여 그 성능을 평가해보았다. 마찬가지로 해석결과는 Kimura 등<sup>7)</sup>이 수행한 실험결과와 비교하였다.

Table. 1 Summary of Test Case

	$V_{inlet}$ (m/s)	Temp. (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Turbulence Intensity (%)
Hot	0.5	31	995.6	5
Cold	0.5	26	996.8	5

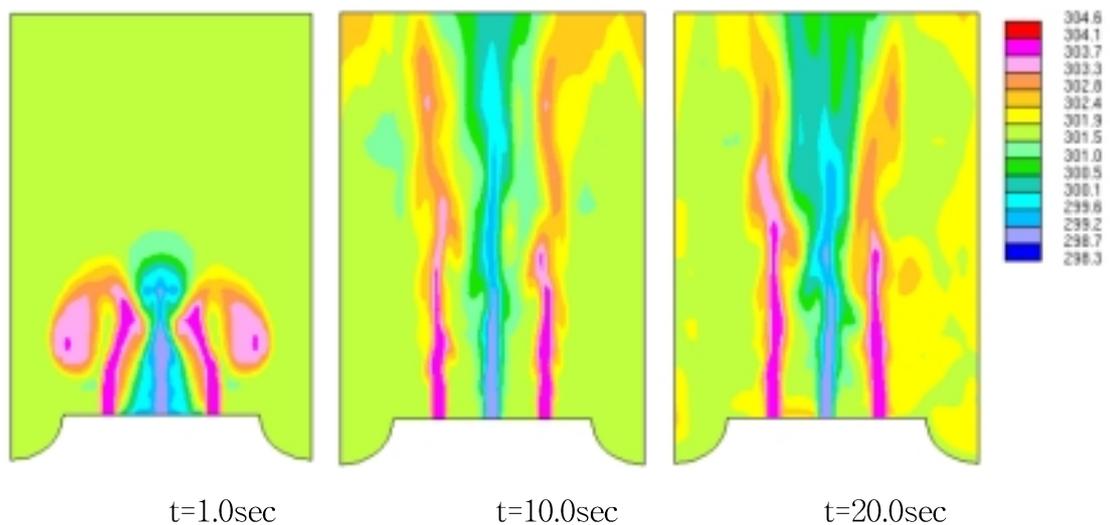


Fig. 2 Temperature Contour at  $y=0.25m$

우선 시간의 경과에 따른 전체적인 유동특성을 파악하기 위하여  $y=0.25m$  단면상에서의 온도분포를 Fig. 2에 나타내었다. 각 제트가 분사되면 유동장의 질량 및 운동량이 증가하게 된다. 분사초기에는 증가된 질량 및 운동량으로 인해 고온제트 좌우로 와류가 생성된다. 이 와류는 재순환류를 발생시켜 고온의 제트를 중앙 쪽으로 모이도록 한다. 따라서 고온제트와 저온제트의 혼합이 일어나려는 경향을 보인다. 시간이 지나면서 각 제트는 분사방향으로 곧게 뻗어 나감을 확인할 수 있는데 분사방향으로의 운동량이 와류로 인한 운동량보다 크기 때문으로 보인다. 실험결과<sup>7)</sup>에서는 제트가 분사되는 대부분의 시간대에서 각 제트의 큰 혼합성향을 볼 수 있었지만 본 수치해석 결과에서는 초기의 짧은 시간 동안에만 그런 성향을 볼 수 있었다. 이는 양 옆 경계면의 경계조건의 차이에 기인한 것으로 보인다. 실험장치에서는 고온 제트의 양 옆으로 고체 경계면이 존재하는데 이 경계면에 의한 강한 와류가 큰 혼합효과를 일으키는데 영향을 줄 수 있을 것으로 추정된다. 한편 본 연구에서는 제한된 해석영역을 감안하여 옆 경계면을 출구경계조건으로 설정하였다. 이에 따라 벽면에 의한 영향이 감소되었고 이것이 제트가 곧게 뻗어나가는 주요인으로 작용하고 있는 것으로 보인다.

Fig. 3~5는 온도의 평균값 및 RMS값의 분포를 나타내 주고 있다. 여기에는 본 연구에서 수행한 결과와 quasi-DNS, 그리고 Kimura 등<sup>7)</sup>이 수행한 실험결과를 함께 비교하여 나타내었다. 온도의 시간평균값의 표준화 및 RMS값은 아래의 식을 사용하여 도출하였다.

$$T_{av}^* = \frac{T_{av} - T_c}{\Delta T} \quad (1)$$

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{av})^2} \quad (2)$$

$$T_{RMS}^* = \frac{T_{RMS}}{\Delta T} \quad (3)$$

평균온도 및 RMS 온도의 분포도 앞서 설명한 특징을 그대로 나타내고 있다. 실험결과는 Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 중앙으로의 혼합성향을 잘 나타내 주고 있다. Kimura 등<sup>7)</sup>의 quasi-DNS결과도 이런 경향을 아주 잘 나타내고 있다. 하지만 LES결과는 유동의 직진 경향을 보여준다. 실험결과<sup>7)</sup>는 평균온도분포의 경우에  $z/d=2.8$ 에서  $z/D=4.2$ 까지, 즉 하류 쪽으로 갈수록 빠른 혼합을 보여 온도분포가 일정해짐을 볼 수 있다. 이에 반해 LES는 혼합속도가 작아 각 영역의 최대 혹은 최소 온도분포를 유지하고 있는 결과를 보이고 있다. 온도의 RMS 값 비교에서는 특히 저온 제트의 하류에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 제트출구에서 난류강도가 제시되어 있지 않아 단정하기는 어려우나 실험에서는 저온 제트의 난류강도가 고온 제트의 난류강도에 비하여 강하기 때문으로 추정된다. 아울러 실험결과는 저온 제트의 분사지점 주변에서 큰 RMS 값을 가지고 있는 것으로 보아 이 영

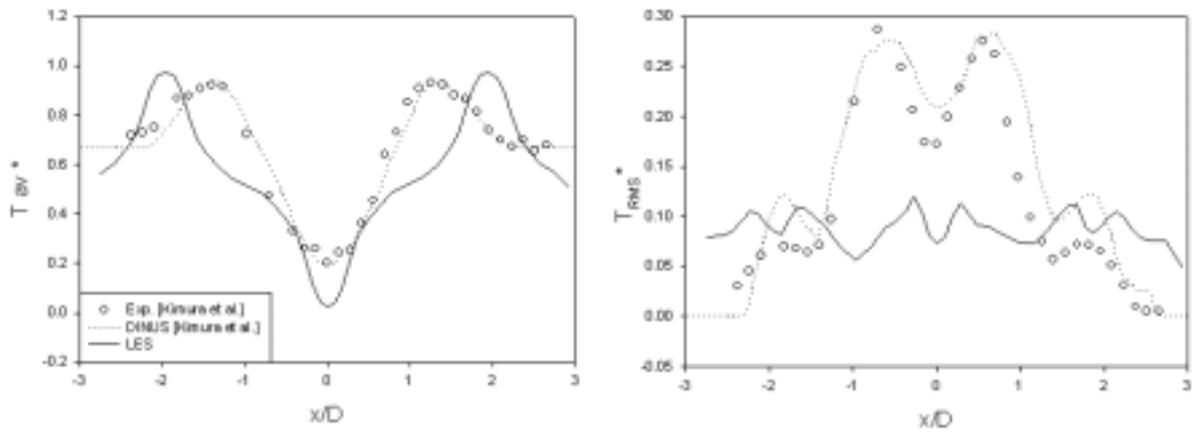


Fig. 3 Temperature and its Variance Variations at  $z/D=2.8$

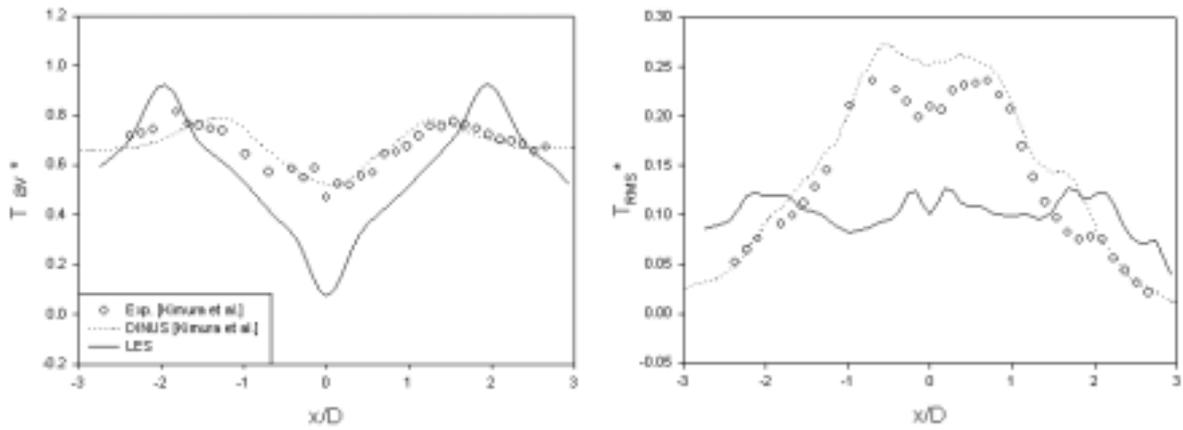


Fig. 4 Temperature and its Variance Variations at  $z/D=4.2$

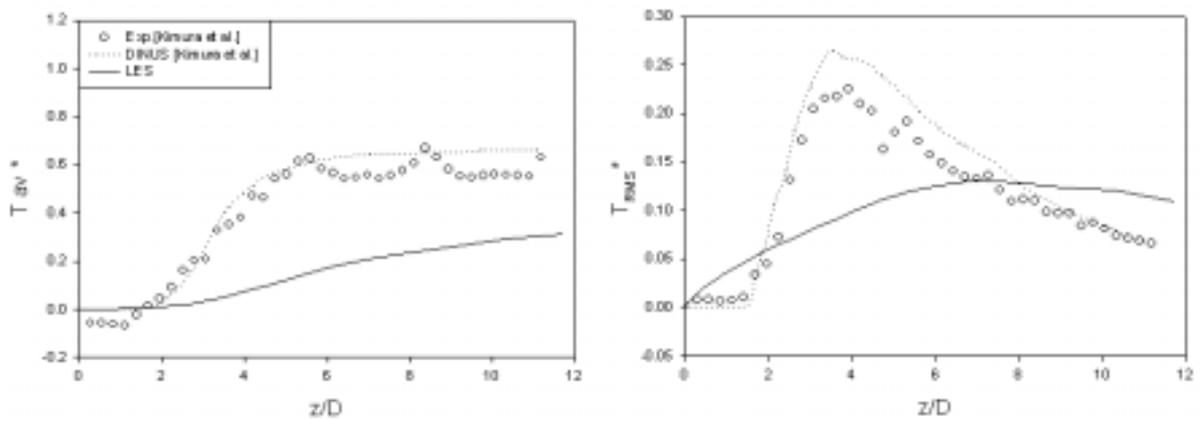
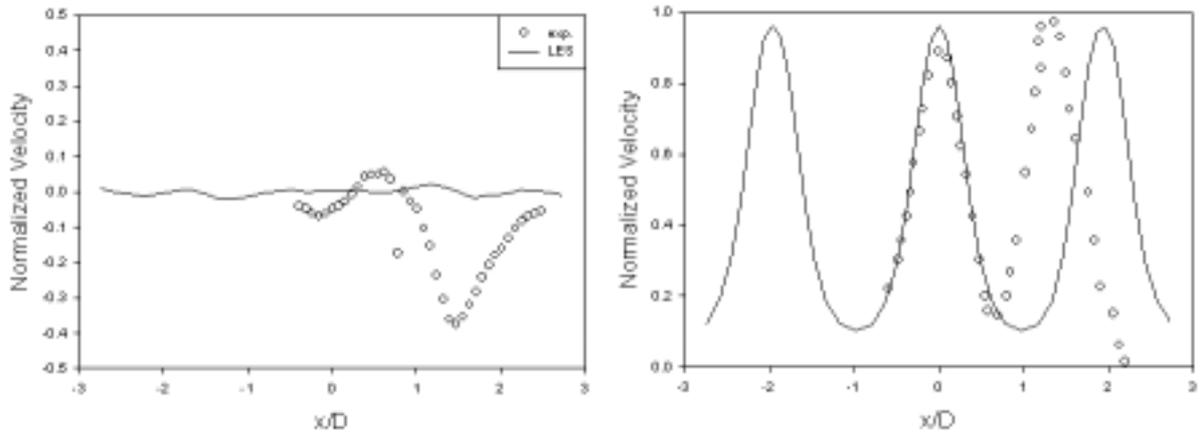


Fig. 5 Temperature and its Variance Variations at  $x/D=0.0$



Horizontal Velocity Component

Vertical Velocity Component

Fig. 6 Velocity Variation at  $z/D=2.8$

역에 큰 난류에너지가 집중되어 있고 그 결과 평균 온도장에서 보인 고온 제트의 중앙 집중화가 이루어진 것으로 판단된다. 반면 LES에서는 저온과 고온 제트의 출구에서 동일한 난류강도를 설정함으로써 온도가 높은 고온 제트의 RMS 값이 더 크게 주어지므로 전체 유동장에서 고온 측의 RMS 값이 크게 예측되고 이에 따라 평균 온도장에서 혼합 효과가 상대적으로 낮게 반영된 것으로 보인다. 저온 제트의 중앙부( $x/D=0$ )에서 분사방향의 온도 분포를 제시한 Fig. 5에서도 LES에 의한 예측결과는  $z/D$ 에 따라 완만한 온도 상승을 보이고 있어 고온 제트에 의한 영향이 늦게 반영되고 있음을 알 수 있다.

평균속도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 속도의 수평방향성분을 보면 실험결과는 그 크기가 크게 나타나는 반면 LES는 아주 작게 나타남을 볼 수 있다. 이는 실험결과<sup>7)</sup>에서 강한 혼합성향이 나타나고 있음을 말한다. 또한 속도의 수직분사방향성분을 보면 실험결과<sup>7)</sup>가 혼합특성을 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다. 여기서 최고 및 최소속도를 가지는 지점이 LES보다 더 중앙 쪽이라는 것이 이를 잘 말해준다.

#### 4. 결론

LES를 이용하여 thermal stripping 현상이 일어날 수 있는 비정상 난류 유동장의 해석을 수행하였고 온도 및 속도의 시간에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 하지만 LES 해석결과는 실험결과에 비해 혼합효과가 저평가되었다. 그 이유는 계산영역 좌우 경계면의 경계조건과 제트분사시의 난류강도의 불명확함 때문으로 보인다. 현재 격자 수에 따른 영향을 보기 위해 세밀한 격자를 구성하여 같은 경우에 대해 계산중이며, 또한 난류강도에 변화를 주어 계산할 필요도 있을 것으로 본다.

## 후 기

본 연구는 2002년 원자력연구개발사업 중 액체금속로 설계기술개발분야의 유체 및 계측제어계통설계 기술개발과제, 그리고 국립창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(4)", PNC ZN9410, 92-105, 1992, Japan.
2. 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, 1997, Japan.
3. Muramatsu, T., "Development of Analytical Model for Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(12)", PNC TN9410, 98-013, 1998, Japan.
4. Yoo, G. J. and Jeon, W. D., "Analysis of Unsteady Turbulent Merging Jet Flows with Temperature Difference", Proceedings of ICONE10, ICONE10-22235, 2002, USA.
5. Jung, J. H. and Yoo, G. J., "Analysis of Unsteady Turbulent Parallel Triple-Jet Flow with Temperature Difference", FEC5, 2002, Japan.
6. D. K. Lilly, "On the Application of the Eddy Viscosity Concept in the Inertial Subrange of Turbulence.", NCAR Manuscript 123, 1966.
7. Kimura, N., Nishimura, M., and Kamide, H., "Study on Convective Mixing for Thermal Stripping Phenomena Experimental Analyses on Mixing Process in Parallel Triple-Jet and Comparisons between Numerical Methods", Private Communication, 2001.
8. STAR-CD Methodology manual, Computational Dynamics Ltd.
9. Smagorinsky, B., "General Circulation Experiments with The Primitive Equations. I. The Basic Experiment", Mon. Weather Rev., Vol. 91, 1963.