

# Ellipting Blending Model에 의한 자연대류 및 열성층 해석

최 석 기\*<sup>1</sup>, 김 성 오\*<sup>1</sup>

## COMPUTATION OF NATURAL CONVECTION AND THERMAL STRATIFICATION USING THE ELLIPTIC BLENDING MODEL

Seok-Ki Choi\*<sup>1</sup> and Seong-O Kim\*<sup>1</sup>

*Evaluation of the elliptic blending turbulence model (EBM) together with the two-layer model, shear stress transport (SST) model and elliptic relaxation model (V2-F) is performed for a better prediction of natural convection and thermal stratification. For a natural convection problem the models are applied to the prediction of a natural convection in a rectangular cavity and the computed results are compared with the experimental data. It is shown that the elliptic blending model predicts as good as or better than the existing second moment differential stress and flux model for the mean velocity and turbulent quantities. For thermal stratification problem the models are applied to the thermal stratification in the upper plenum of liquid metal reactor. In this analysis there exist much differences between the turbulence models in predicting the temporal variation of temperature. The V2-F model and EBM better predict the steep gradient of temperature at the interface of thermal stratification, and the V2-F model and EBM predict properly the oscillation of temperature. The two-layer model and SST model fail to predict the temporal oscillation of temperature.*

**Key Words:** 자연대류(Natural Convection), 열성층(Thermal Stratification), 난류모델(Turbulence Model)

### 1. 서 론

액체금속로 상부 고온 풀(pool)에서의 열유동 현상을 정확하게 파악하는 것은 액체금속로 안전성과 고체구조물의 구조적 건전성 확보에 매우 중요하다. 원자로가 정지(scram)되면 원자로 power는 급격하게 감소하고, 냉각재의 유속(flow rate)도 감소하게 된다. 원자로 power가 감소하는 속도가 냉각재 유속이 감소하는 것 보다 빠르기 때문에 노심 출구온도가 시간이 흐름에 따라 급격히 감소한다. 그러므로 노심으로부터 나오는 저온의 냉각재는 고온 풀에 저속(low velocity)으로 유입된다. 고온 풀에 유입되는 저온의 냉각재는 본래 풀에 있는 고온의 냉각재 보다 밀도가 크기 때문에 상부 고온 풀의 하부로 흘러 들어가게 되고, 대부분의 상부 풀의 냉각재는 고온인 상태로 존재한다.

이러한 현상이 열적으로 성층인 현상을 유발하게 되고, 원자로 상부 풀에 존재하는 고체구조물 및 원자로 vessel에 축 방향으로 상당한 정도의 온도구배(temperature gradient)를 형성하고 열적응력(thermal stress)을 유발하여 구조적 건전성 문제가 야기된다. 그러므로 원자로 상부 풀에서의 열성층 현상을 파악하고, 예측할 수 있는 기술의 확보는 액체금속로 설계에 매우 중요하다. 원자력 선진국, 특히 일본 JAEA에서는 이 문제를 해결하기 위하여 많은 실험적 연구가 수행되어 왔다. 이들의 해석적인 연구를 종합하여 보면 수치해석상 대류항차리법과 난류모델의 적절한 선택이 열성층 현상의 정확한 예측에 중요한 인자임을 보였다.

자연대류 문제에 대한 정확한 해석은 사고 시 액체금속로 피동 잔열제거 계통 해석 및 원자로 내부 온도 해석 등에 필요한 열전달계수 설정에 매우 중요하다. 지금까지 액체금속로 피동 잔열제거 설계 시 사용되는 자연대류 현상에 대한 열전달계수의 실험자료는 매우 제한적이고, 기하학적조건이나 유동형태가 다르면 열전달계수의 설정이 다를 수 있다. 그러므로 실험적 자료가 정확한 유동에 적용하여 난류모델을 검증

\*1 정희원, 한국원자력연구소, 유체공학연구부

\* Corresponding author E-mail: kchoi@kaeri.re.kr

한 후, 그 난류모델을 사용하여 액체금속로 피동 잔열제거의 해석에 적용하면 비교적 정확한 열유동 설계를 수행할 수 있을 것이다. 난류 자연대류 유동은 실험을 수행하기가 매우 어려워 현재까지 난류모델을 평가하기 위한 정확한 실험자료가 거의 희박한 편인데 난류자연대류 유동에 대한 난류모델을 평가할 수 있는 정확도의 실험자료는 King [1]의 자료가 있다.

본 연구에서는 현재 널리 사용되거나 최근에 개발된 3종류의 난류모델들을, elliptic blending model (EBM)[2], elliptic relaxation model (V2-F)[3], shear stress transport model[4]과 two-layer model[5]을 자연대류 및 열성층 유동해석에 적용하여 평가하고자 한다. 특히 elliptic blending model은 최근에 개발되어 해석결과가 우수한 것으로 판명되고 있다. 이 모델은 기하학적 변수가 없어 상용코드에 도입이 용이하다. 그러므로 이 모델을 액체금속로의 중요한 열유동 현상인 자연대류 및 열성층 해석에 적용하여 평가하는 것은 중요한 의미가 있다. 국내에서는 아직까지 액체금속로 관련 자연대류 및 열성층 현상에 대한 실험적 연구가 전무하다. 이러한 이유로 자연대류 유동의 경우 King[1]의 실험자료를 사용하고, 열성층 문제인 경우는 일본 JAEA에서 수행한 여러 가지 실험들 중에 하나를 선택, 해석하여 난류모델들을 평가하고자 한다.

## 2. 지배방정식

Elliptic blending model에서는 연속방정식, 운동방정식, Reynolds 응력항들과 난류에너지 소산항은 다음의 미분방정식으로 구한다.

$$\frac{D}{Dt}(\rho) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) - \rho \beta g_i (\Theta - \Theta_{ref}) \quad (2)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \Theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} - \overline{\rho \Theta u_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{D}{Dt}(\overline{\rho u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu \delta_{kl} + C_s \rho \overline{u_k u_l} T \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_l} \right]$$

$$+ (P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij}) \quad (4)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \mu \delta_{kl} + C_\varepsilon \rho \overline{u_k u_l} T \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right] + \frac{(C_{\varepsilon 1}(P_k + G_k) - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon)}{T} \quad (5)$$

$$\frac{D}{Dt}(\overline{\rho \theta^2}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} \delta_{kl} + C_{\theta\theta} \rho \overline{u_k u_l} T \right) \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_l} \right] + \left( 2P_\theta - 2R \frac{\varepsilon}{k} \overline{\rho \theta^2} \right) \quad (6)$$

$$\alpha - L^2 \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x_j \partial x_j} = 1 \quad (7)$$

$$\Phi_{ij} = (1 - \alpha^2) \Phi_{ij}^w + \alpha^2 \Phi_{ij}^h \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ij}^h = & - \left( C_1 + C_2 \frac{P}{\varepsilon} \right) \varepsilon A_{ij} + C_3 k S_{ij} \\ & + C_4 k \left( A_{ik} S_{jk} + A_{jk} S_{ik} - \frac{2}{3} \delta_{ij} A_{lk} S_{lk} \right) \\ & + C_{54} k (A_{ik} \Omega_{jk} + A_{jk} \Omega_{ik}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Phi_{ij}^w = -5 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u_i u_k n_j n_k} + \overline{u_j u_k n_i n_k} - \frac{1}{2} C_1 \overline{u_k u_l n_l n_l} (n_i n_j + \delta_{ij}) \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ij} = (1 - \alpha^2) \frac{\overline{u_i u_j}}{k} \varepsilon + \frac{2}{3} \alpha^2 \varepsilon \delta_{ij} \quad (11)$$

$$A_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij}, \quad n = \frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|} \quad (12)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

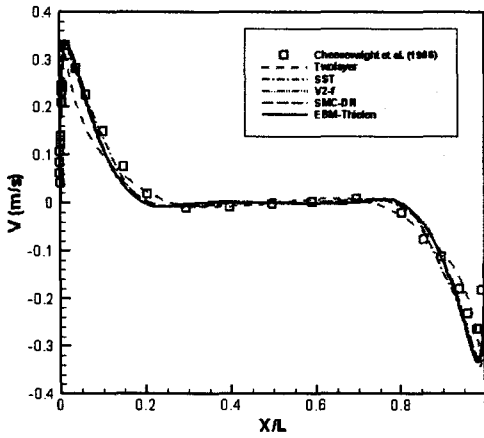


Fig.1 Mean vertical velocity profiles at  $y/H=0.5$

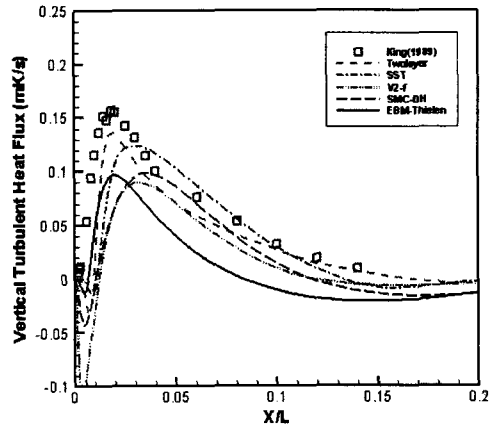


Fig.4 Turbulent heat fluxes profiles at  $y/H=0.5$

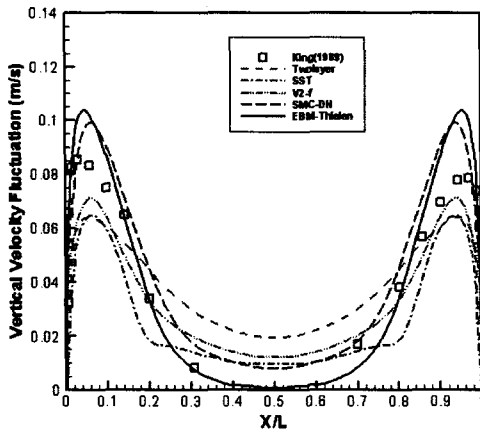


Fig.2 Vertical velocity fluctuation profiles at  $y/H=0.5$

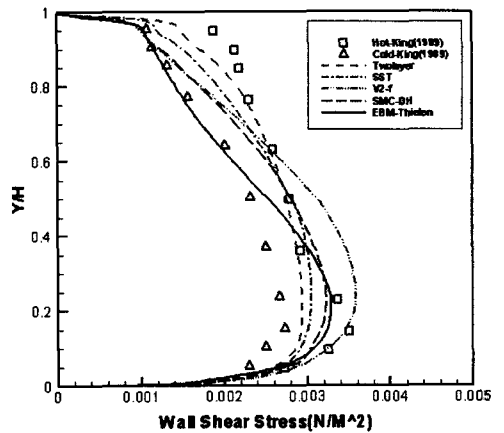


Fig.5 Wall shear stress profile along the hot wall

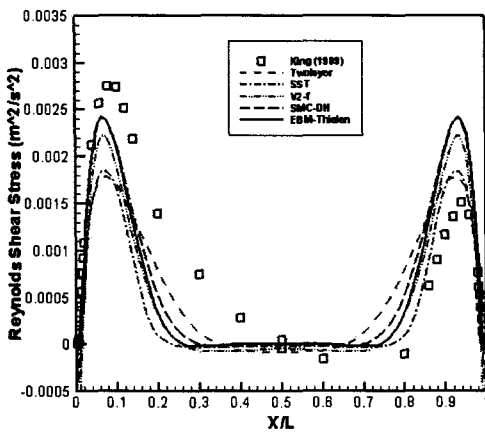


Fig.3 Reynolds shear stress profiles at  $y/H=0.5$

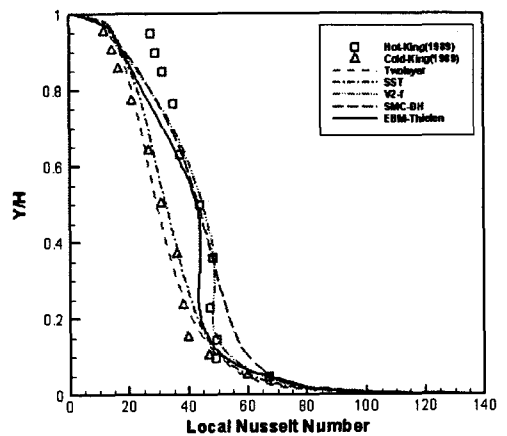


Fig.6 Local Nusselt number along the hot wall

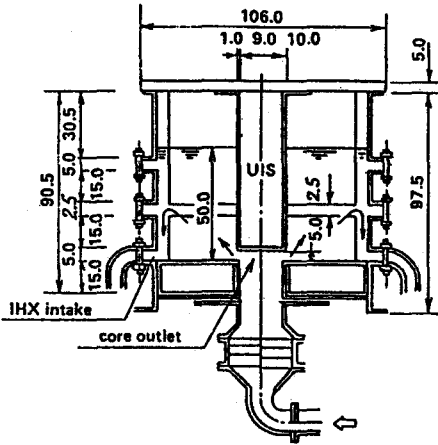


Fig. 7 JAEA experimental apparatus

$$T = \max\left(\frac{k}{\varepsilon}, C_T \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2}\right), \quad (14)$$

$$L = C_L \max\left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, C_\eta \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/4}\right) \quad (15)$$

이다. Thielen et al. [3]의 EBM에서는 난류열유속은 다음의 대수학적 방정식으로부터 구한다.

$$\overline{\theta u_i} = -C_\theta \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \quad (16)$$

위 식들에서의 상수들의 값은 Thielen et al. [3]에 있으므로 여기에서는 생략한다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 자연대류 문제

본 연구에서 해석하는 자연대류문제는 높이와 폭의 비가 5:1인 직사각형 공동(cavity)에서의 자연대류 문제이다. 직사각형 공동의 높이  $H = 2.5m$  이고 폭  $L = 0.5m$  이고, 고온 벽과 저온 벽의 온도차는 45.8K이다. 직사각형 높이를 기준으로 한 Rayleigh 수는  $Ra = 4.5 \times 10^{10}$  이고, Prandtl 수는

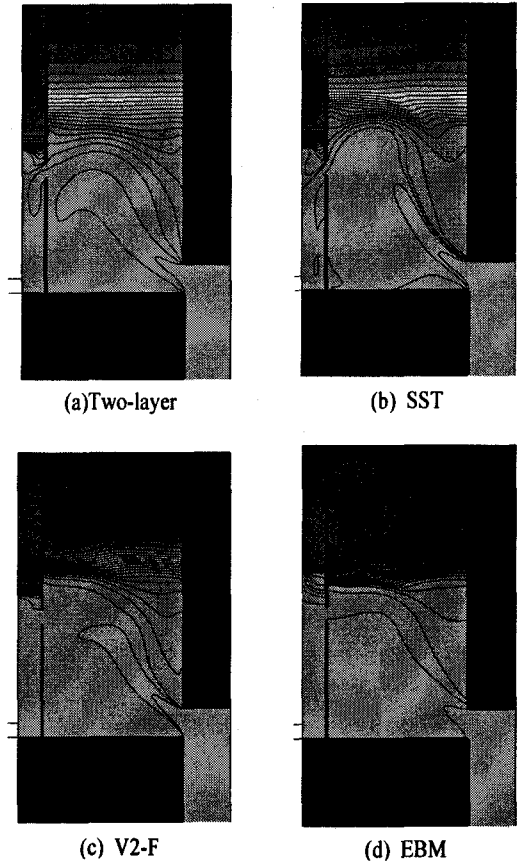


Fig. 8 Isothermal lines after 200 seconds

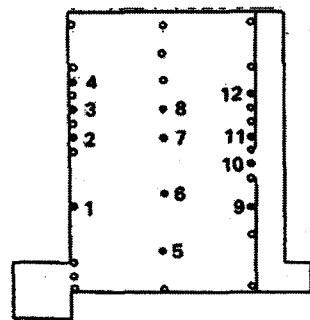
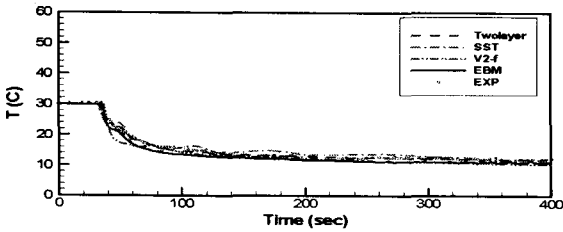


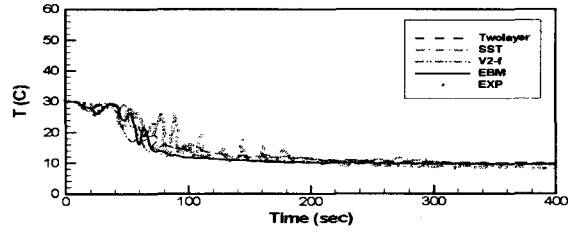
Fig.9 Each monitoring locations

$Pr = 0.7$  이다. King[1]이 광범위하게 실험을 수행하였다.

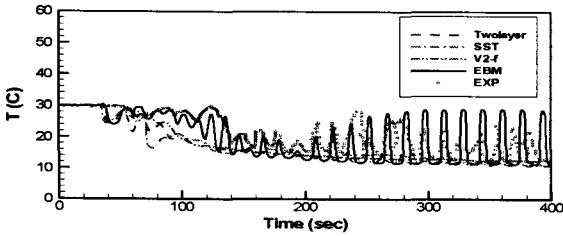
Fig.1에서 Fig.6까지의 그림에서 관찰되는 바와 같이 EBM이 가장 정확하게 시간평균 속도 및 난류변수들을 예측함을 관찰할 수 있다. Fig.1은 시간평균 속도는 SST, V2-f, SMC-DH [6] 및 EBM 모델들이 거의 같은 정확도로 예측함을 관찰할



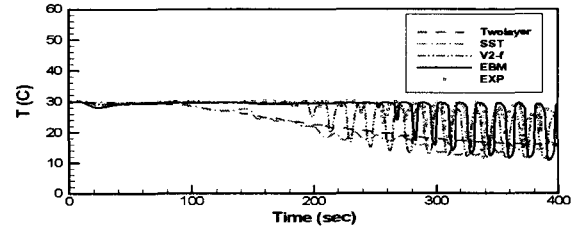
(a) location 1



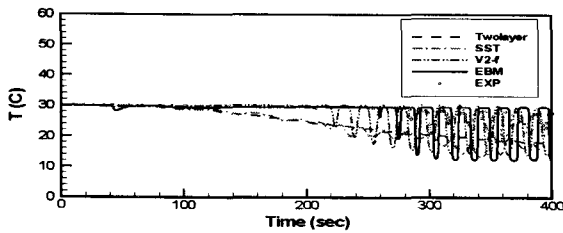
(f) location 10



(b) location 2

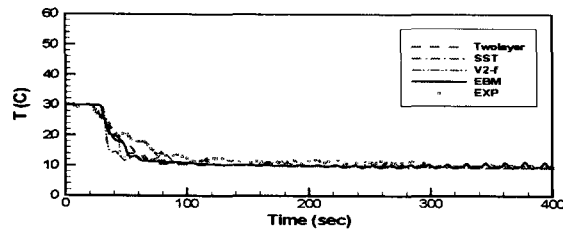


(g) location 12

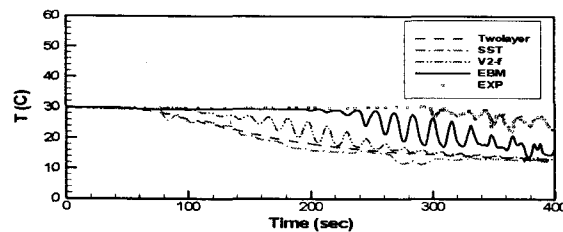


(c) location 4

Fig.10 Temporal variation of temperature at the monitoring locations



(d) location 6



(e) location 8

수 있다. 그러나 two-layer 모델은 층류인 경우와 비슷한 해를 산출함을 볼 수 있다. 수직속도 요동, Reynolds 난류전단 응력, 난류열유속 등의 값들은 EBM 모델이 가장 정확하게 계산함을 볼 수 있다. 또한 벽면전단응력 및 국부 Nusselt 수도 EBM 모델이 다른 모델들 보다 실험에서 보여주는 경향을 가장 잘 따름을 알 수 있다. 같은 Second-Moment Model이라도 EBM이 SMC-DH 모델보다 더 정확하게 거의 모든 변수들을 예측하고 있다.

### 3.1 열성층 문제

본 연구의 해석대상은 일본 JAEA에서 수행한 열성층 실험 중 한 경우이다. 실험장치와의 대략적인 모형은 Fig.7에 도식화되어 있다. 물을 작동유체로 사용하였으며, 입구온도는 10 초 동안 29.9°C에서 8.3°C로 변하며, 입구유속은 1.99 l/sec이다. 입구 원통관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈수는  $Re=12,300$ 이고 Richardson 수는  $Ri=2.0$ 이다.

Fig.8 (a)-(d)는 4개의 서로 다른 난류모델에 의해 계산된 202초 후 고온 풀에서의 등온선의 분포를 보여주고 있다. 모든 모델들에 의한 계산결과는 실험의 결과와 매우 유사함을 관찰할 수 있다. 다만 v2-f 모델과 EBM이 two-layer 모델이나 SST 모델보다 열성층 경계면 (interface)에서 실험결과에서 관찰되는 급격한 온도구배의 분포를 좀 더 정확하게 예측함을

관찰 할 수 있다.

Fig.9는 JAEA 실험에서 온도를 시간에 따라 monitoring 한 지점들을 보여주고 있다. Fig.10 (a)-(g)는 난류모델들에 의하여 계산된 결과를 실험치와 같이 보여주고 있다. 이들 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 온도의 시간적 변화는 모든 난류모델 간의 예측결과가 큰 차이가 있음을 관찰할 수 있다. 예측결과는 실험의 결과와 유사하나 two-layer 모델이나 SST 모델은 온도의 요동 (temperature fluctuation) 현상을 적절히 묘사하지 못함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 최근에 널리 사용되고 있는 난류모델의 수식들을 공식화하였으며, 기존의 실험을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 자연대류인 경우 EBM 모델이 시간평균 속도에 대하여서는 기존의 모델과 비슷한 수준의 정확도를 갖는 해를 산출하나, 여러 종류의 난류변수들에 대해서는 기존의 어느 모델보다 정확도가 높은 해를 산출하였다. 열성층 해석 시에는 난류열유속에 대하여 대수열유속 모델이나 미분열유속 방법을 사용하면 각 난류모델간의 시간에 따른 온도변화의 예측에는 큰 차이는 없으나, EBM과 v2-f 모델이 열성층 경계면에서의 급격한 온도구배를 좀 더 정확하게 묘사하고, 온도의 요동현상을 적절히 해석함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다. 또한 이 연구는 KISTI의 제 7차 전략과제에서 제공하는 슈퍼컴퓨터를 사용하여 연구를 수행하였고, 이에 관계자에게 고마움을 표시한다.

#### 참고문헌

- [1] King, K.V., "Turbulent natural convection in rectangular air cavityies," Ph.D Thesis, Queen Mary College, University of London, UK, (1989).
- [2] Thielen, L., Hanjalic, K, Jonker, H. and Manceau, "Predictions of flow and heat transfer in multiple impinging jets with an elliptic-blending second-moment closure" Vol.48, (2005) p. 1583-1598.
- [3] Durbin, P.A., "Separated flow computations with the  $k-\varepsilon-\sqrt{v^2}$  model," *AIAA J.*, Vol.33, (1995), p. 659-664.
- [4] Menter, F.R., "Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA J.*, Vol.32 (1994), p. 1598-1604...
- [5] Chen, H.C. and Patel, V.C., "Near-wall turbulence models for complex flows including separation," *AIAA J.*, Vol.26, (1988), p. 641-648.
- [6] Dol, H.S. and Hanjalic, K.. "Computational study of turbulent natural convection in a side -heated near-cubic enclosure at high Rayleigh number," *Int. J. Heat Mass transfer*, 44 (2001), p. 2323-2344.