

열성층 해석 난류모델 평가

최 석 기^{*1}, 김 세 윤², 김 성 오¹

EVALUATION OF TURBULENCE MODELS FOR ANALYSIS OF THERMAL STRATIFICATION

Seok-Ki Choi^{*1}, Seyun Kim² and Seong-O Kim¹

A computational study of evaluation of current turbulence models is performed for a better prediction of thermal stratification in an upper plenum of a liquid metal reactor. The turbulence models tested in the present study are the two-layer model, the shear stress transport (SST) model, the v2-f model and the elliptic blending mode(EBM). The performances of the turbulence models are evaluated by applying them to the thermal stratification experiment conducted at JNC (Japan Nuclear Corporation). The algebraic flux model is used for treating the turbulent heat flux for the two-layer model and the SST model, and there exist little differences between the two turbulence models in predicting the temporal variation of temperature. The v2-f model and the elliptic blending model better predict the steep gradient of temperature at the interface of thermal stratification, and the v2-f model and elliptic blending model predict properly the oscillation of the ensemble-averaged temperature. In general the overall performance of the elliptic blending model is better than the v2-f model in the prediction of the amplitude and frequency of the temperature oscillation.

Key Words: 열성층(Thermal Stratification), 난류모델(Turbulence Model), 비정상열유동(Unsteady Heat Flow)

1. 서 론

액체금속 원자로 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(UIS) 및 원자로 용기에 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. 원자로 선진국, 특히 일본에서는 이 문제를 해결하기 위하여 많은 실험적 연구와 해석적 연구가 수행되어 왔다. 이들의 해석적인 연구를 종합하여 보면 수치해석상 대류항처리법과 난류모델의 적절한 선택이 열성층 현상의 정확한 예측에 중요한 인자임을 보였다. 그러나 일본 JNC(Japan Nuclear Corporation)의 연구는 난류모델의 종류의 선택에 매우 제한적인($k-\epsilon$ 모델과 대수응력 및 열유속모델) 연구를 수행하여 그들이 내린 결론은 충분하지 못하다. 본 연구에서는 현재 가장 널리 사용되는 4가지 종류의 난류모델을 평가하고자 한다. 국내에서는 아직까지 액체금속로 관련 열성층 현상에 대한 실험적 연구가 전무하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 일본 JNC에서 수행한 실험들 중에 하나를 선택, 해석하여 난류모델들을 평가하고자 한다.

접수일: 2005년 3월 18일, 심사완료일: 2005년 11월 17일.

1 정희원, 한국원자력연구소, 유체공학연구부

2 한국원자력연구소, 유체공학연구부

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

2. 수학적 공식화

2.1 지배방정식

Reynolds 평균방법은 다음과 같이 유동의 변수 Φ 를 다음과 같이 분할한다.

$$\Phi = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi} + \Phi' \quad (1)$$

$$\Phi = \langle \Phi \rangle + \Phi' \quad (2)$$

식 (2) 에서 $\langle \Phi \rangle = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi}$ 이다. 위 식들에서 $\bar{\Phi}$ 는 시간평균값, $\tilde{\Phi}$ 는 periodic인 요동, 그리고 Φ' 는 stochastic 난류요동값을 나타낸다. 일반적으로 $\langle \Phi \rangle$ 를 ensemble-average 값이라 부른다. 지배방정식들을 위의 방법을 사용하여 평균하면 다음과 같다.

$$\frac{D}{Dt}(\rho) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \langle u_i \rangle) = -\frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \rho \langle u_i' u_j' \rangle \right) \quad (4)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \langle T \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial x_j} - \rho \langle T' u_j' \rangle \right) \quad (5)$$

여기부터는 $\langle u_i \rangle = U_i$, $\langle P \rangle = P$, $\langle u_i' u_j' \rangle = \overline{u_i u_j}$ 와 $\langle T \rangle = \Theta$, $\langle T' u_j' \rangle = \overline{\theta u_j}$ 로 표시한다. 시간평균외 결과로 운동방정식에는 \overline{uu} , \overline{vv} , \overline{ww} , \overline{uv} 등의 레이놀즈 응력항들, 에너지방정식에는 $\overline{\theta u}$, $\overline{\theta v}$ 등의 난류 열유속항들의 미지수가 생성되었다. 이들을 계산하기 위하여 난류모델이 필요한 것이다. 본 연구에서는 two-layer 모델[1], shear stress model (SST)[2], v2-f 모델[3] 및 elliptic blending model (EBM)[4]을 평가하였다. 이들 모델에 대한 지배방정식들은 참고문헌들에 잘 정리되어 있으므로, 본 논문에서는 elliptic blending model (EBM)에 대한 지배방정식만 제시하고자 한다.

2.2 Elliptic Blending Model

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

$$\frac{D}{Dt}(\rho) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) - \rho \beta g_i (\Theta - \Theta_{ref}) \quad (7)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \Theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} - \rho \overline{\theta u_j} \right) \quad (8)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \overline{u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu \delta_{kl} + C_s \rho \overline{u_k u_l} T \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_l} \right] + (P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij}) \quad (9)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu \delta_{kl} + C_\varepsilon \rho \overline{u_k u_l} T \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right] + \frac{(C_{\varepsilon 1} (P_k + G_k) - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon)}{T} \quad (10)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \overline{\theta^2}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} \delta_{kl} + C_{\theta\theta} \rho \overline{u_k u_l} T \right) \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_l} \right] + \left(2P_\theta - R \frac{\varepsilon}{k} \rho \overline{\theta^2} \right) \quad (11)$$

$$\alpha - L^2 \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x_j \partial x_j} = 1 \quad (12)$$

위 식에서

$$\Phi_{ij} = (1 - \alpha^2) \Phi_{ij}^w + \alpha^2 \Phi_{ij}^h \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ij}^h = & -C_1 \varepsilon A_{ij} + C_3 k S_{ij} \\ & + C_4 k \left(A_{ik} S_{jk} + A_{jk} S_{ik} - \frac{2}{3} \delta_{ij} A_{kl} S_{kl} \right) \\ & + C_5 k (A_{ik} \Omega_{jk} + A_{jk} \Omega_{ik}) \\ & - C_6 (G_{ij} - \frac{2}{3} G_k \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Phi_{ij}^w = -5 \frac{\epsilon}{k} \left(\begin{array}{c} \overline{u_i u_k n_j n_k} + \overline{u_j u_k n_i n_k} \\ - \frac{1}{2} C_1 \overline{u_k u_l n_k n_l} (n_i n_j + \delta_{ij}) \end{array} \right) \quad (15)$$

$$\epsilon_{ij} = (1 - \alpha^2) \frac{\overline{u_i u_j}}{k} \epsilon + \frac{2}{3} \alpha^2 \epsilon \delta_{ij} \quad (16)$$

이고

$$A_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij}, \quad n = \frac{\nabla \alpha}{\|\nabla \alpha\|} \quad (17)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

$$T = \max \left(\frac{k}{\epsilon}, C_T \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \right) \quad (19)$$

$$L = C_L \max \left(\frac{k^{3/2}}{\epsilon}, C_\eta \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/4} \right) \quad (20)$$

이다. Thielen et al.[1]의 EBM에서는 난류열유속은 다음의 대수학적 방정식으로부터 구한다.

$$\overline{\theta u_i} = -C_\theta \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \quad (21)$$

위 식들에서의 상수들의 값은 Thielen et al.[4]에 있으므로 여기에서는 생략한다.

2.2 경계조건

경계조건은 원자력연구소에서 난류모델 평가를 위해 특별히 개발한 FLOW-2D 코드에서 제공하는 경계조건을 사용하였다. 벽면에서는 no slip 조건과 단열조건을 사용하였고, 입구에서는 다음과 같은 입구조건을 사용하였다.

$$U = 0, \quad V = V_{in} \quad (22)$$

$$\overline{uu_{in}} = \overline{vv_{in}} = \overline{ww_{in}} = \frac{2}{3} k_{in}, \quad \overline{uv_{in}} = 0, \quad \epsilon = \epsilon_{in} \quad (23)$$

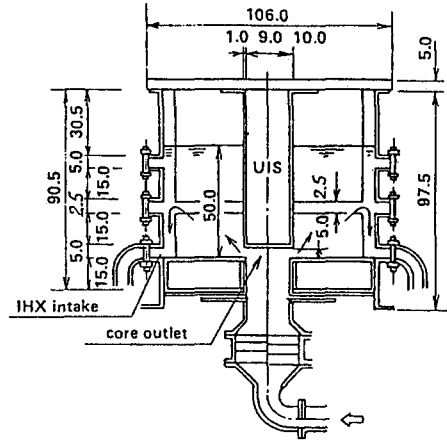


Fig. 1 Experimental apparatus for JNC thermal stratification experiment

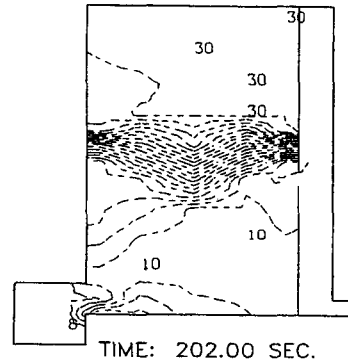


Fig. 2 The distribution of isothermal lines for JNC experiment after 202sec.

$$\Theta = \Theta_{in}(t), \quad \overline{\theta u_{in}} = \overline{\theta v_{in}} = 0 \quad (24)$$

$$k_{in} = 1.5 \times (0.037 U_{in})^2, \quad \epsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / (0.3D) \quad (25)$$

위 식에서 D 는 이산화길이척도 (dissipation length scale)이다. 본 연구에서는 D 는 입구에서의 수력학적 직경(hydraulic diameter)을 사용하였다. 입구에서의 속도 V_{in} 과 온도 Θ_{in} 은 실험조건을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 해석대상 문제

본 연구의 해석대상은 일본 JNC에서 수행한 열성층 실험

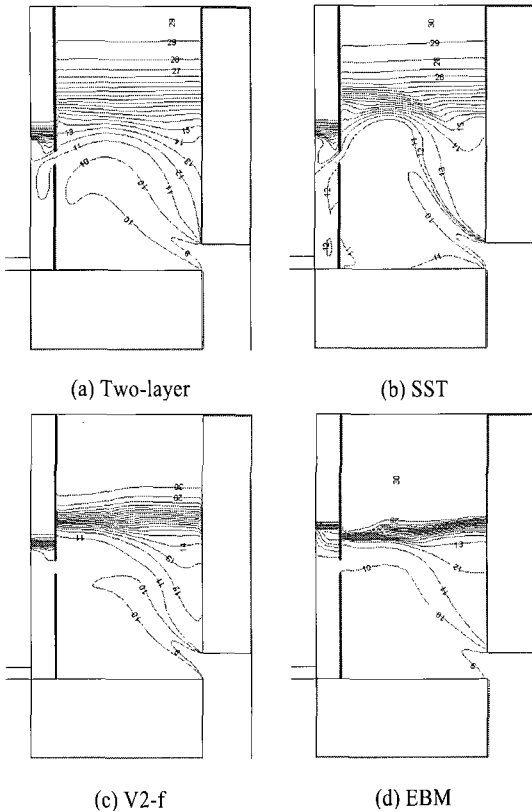


Fig. 3 The distribution of isothermal lines after 202sec.

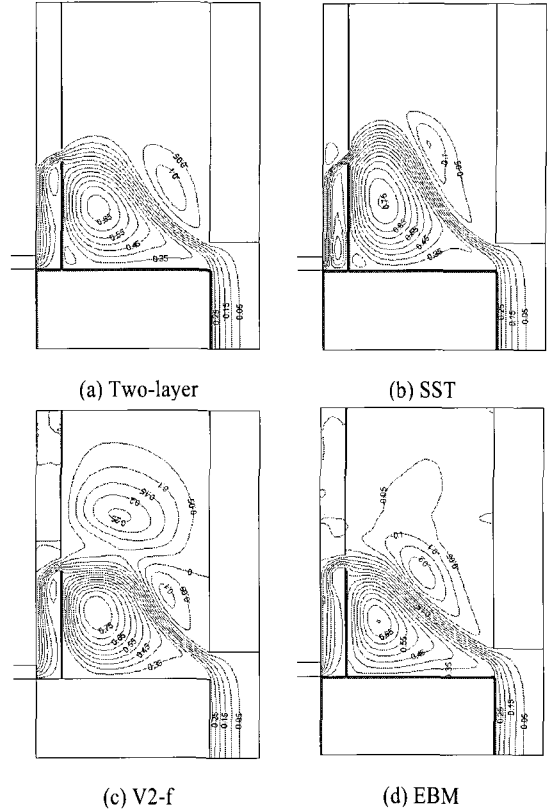


Fig. 4 The distribution of streamlines after 202sec.

[5] 중 한 경우이다. 실험장치의 대략적인 모형은 Fig. 1에 도식화되어 있다. 물을 작동유체로 사용하였으며, 입구온도는 10초 동안 29.9℃에서 8.3℃로 변화하며, 입구유속은 1.99 l/sec 이다. 입구 원통관의 직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 $Re=12,300$ 이고 Richardson 수는 $Ri=2.0$ 이다. Fig. 1에서 해석영역은 축대칭의 한 단면이고, 입구는 core outlet 시작부분이고, 출구는 IHX intake 부분이다. 축 방향 상부 해석영역 끝은 자유표면이다.

3.2 계산결과 토의

열성층 현상에 대한 난류모델을 평가하기 위하여 일본 JNC 에서 수행한 실험[5] 중 1개를 선택하여 계산을 수행하였다. Fig. 1에서 보여주는 열유동 현상은 3차원이다. 그러나 유입 되는 유량이 적어 자유표면은 거의 정지된 상태이고, 난류모델을 사용하여 해석하므로 2차원 축대칭으로 가정하여도 무리가 없다고 사료된다. 계산에 사용된 수치격자는 142(축방향) X 93(반경방향)이다. 시간간격 0.005초를 사용하여 400초까지 계산을 수행하였다. Two-layer 모델과 SST 모델은 대수열유속 모델을 사용하여도 수렴이 잘 되었으나, V2-f 모델은 대수열

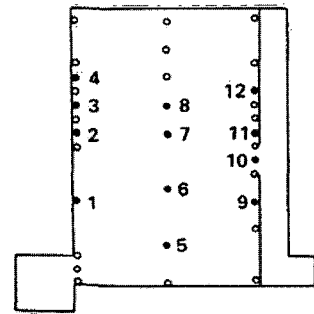


Fig. 5 The monitoring locations

유속모델을 사용할 경우 수렴이 되지 않아서, 대신 미분열유속모델을 사용하였다. 수치적 방법으로는 잘 알려진 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 대류항 처리법으로는 고차유계해법인 HPLA[7]해법을 사용하였다.

Fig. 2는 JNC 열성층 실험에서의 202초 후 고온 풀에서의 등온선 분포를 보여주고 있다. Fig. 3(a)-(d)는 4개의 서로 다른 난류모델에 의해 계산된 202초 후 고온 풀에서의 등온선

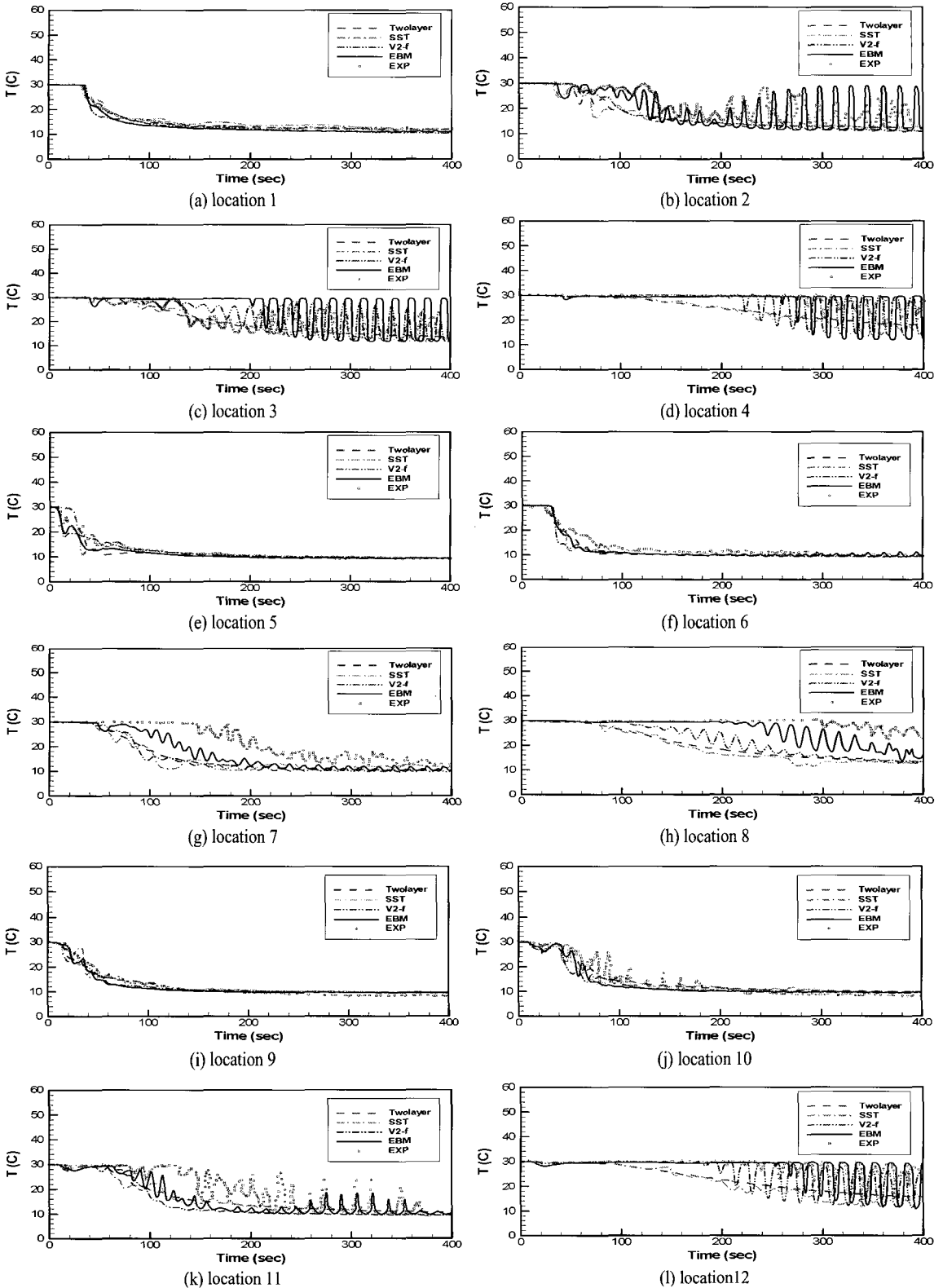


Fig. 6 The time variation of temperature field at the monitoring locations

의 분포를 보여주고 있다. 모든 모델들에 의한 계산결과는 실험의 결과와 경향은 유사하나, 정량적으로는 많은 차이가 있음을 관찰 할 수 있다. Two-layer 모델이나 SST 모델은 열성층 경계면 (interface)에서 실험결과에서 관찰되는 급격한 온도 구배의 분포를 적절하게 예측하지 못함을 관찰 할 수 있다. V2-f 모델은 실험결과에서 관찰되는 급격한 온도구배의 분포를 비교적 적절하게 예측하지만, EBM모델의 결과가 V2-f모델 보다 좀 더 실험의 결과와 유사하게 예측함을 볼 수 있다.

Fig. 4(a)-(d)는 202초 후 고온 풀에서의 4개의 서로 다른 난류모델에 의해 계산된 유선의 분포를 보여주고 있다. Fig. 3에서 관찰된 등온선의 분포와 그 경향이 일치한다. Two-layer 모델이나 SST 모델의 계산결과와 경우 유동의 열혼합이 비교적 잘 이루어져 V2-f 모델과 EBM 모델 보다 찬 온도의 유동이 위쪽으로 조금 더 침투함을 관찰 할 수 있다. EBM모델의 경우 열성층 경계면 (interface)에서의 급격한 온도구배 때문에 열혼합이 충분히 이루어지지 못해 유동이 상방향으로 침투하지 못함을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 JNC 실험에서 온도를 시간에 따라 monitoring한 지점들을 보여주고 있다. Fig. 6(a)-(l)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 경향은 유사하나 two-layer 모델과 SST 모델은 온도의 요동 (temperature oscillation) 현상을 전혀 모사하지 못함을 알 수 있다. V2-f 모델과 EBM모델은 two-layer 모델이나 SST모델의 계산결과에서 관측되지 못한 온도요동현상을 비교적 적절히 예측하나 EBM모델이 더 정확하게 예측함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근에 널리 사용되고 있는 난류모델들을 사용하여 일본 JNC에서 수행한 열성층 실험을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 열성층 해석 시 대수열 유속 모델이나 미분열유속 방법을 사용하면 각 난류모델간의

시간에 따른 온도변화의 예측에는 큰 차이는 없으나, V2-f 모델과 EBM 모델이 열성층 경계면에서의 급격한 온도구배를 좀더 정확하게 모사하고, 온도의 요동현상은 V2-f 모델과 EBM 모델만 적절히 해석함을 알 수 있었다. 전체적인 해석 결과를 종합하여 보면 EBM모델이 가장 정확하게 열성층 현상을 예측하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Chen, H.C. and Patel, V.C., 1988, "Near-wall turbulence models for complex flows including separation," *AIAA J.*, Vol.26, p.641-648.
- [2] Menter, F.R., 1994, "Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, Vol.32, p.1598-1604.
- [3] Durbin, P.A., 1995, "Separated flow computations with the $k - \epsilon - \overline{v^2}$ model," *AIAA J.*, Vol.33, p.659-664.
- [4] Thielen, L., Hanjalic, K, Jonker, H. and Manceau, R., 2005, "Predictions of flow and heat transfer in multiple impinging jets with an elliptic-blending second-moment closure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.48, p.1583-1598.
- [5] Maekawa, I., Muramatsu, T. and Matsumoto, M., 1987, "Investigation of thermal stratification phenomena in reactor vessels: assessment of applicability of multi-dimensional analysis code," *PNC N9410* 87-173.
- [7] Zhu, J., 1991, "A low-diffusive and oscillation free convection scheme," *Comm. Appl. Numer. Methods*, Vol.7, p.225-232.