

액체금속로 열성층 해석 난류모델 평가

Evaluation of Turbulence Models for Analysis of Thermal Stratification in a Liquid Metal Reactor

최석기, 위명환, 전원대, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로 상부구조물에서의 열성층현상을 적절하게 해석하기 위하여 현재 널리 사용되고 있는 난류모델을 평가하였다. JNC에서 수행한 열성층 실험에 적용하여 그 적절성을 평가하였다. 본 연구에서는 현존하는 많은 난류모델 중 two-layer모델, $k-\omega$ 모델, v2-f 모델 및 저 레이놀즈수 미분 응력 및 열유속 모델 등을 평가하였다. 열성층 해석시 난류열유속을 대수열유속 모델이나 미분 열유속 방법을 사용하여 처리하면 각 난류모델간의 시간에 따른 온도변화의 예측에는 큰 차이는 없으나, v2-f 모델과 저 레이놀즈수 미분 응력 및 열유속 모델이 열성층 경계면에서의 급격한 온도구배를 좀더 정확하게 모사하고, 온도의 요동현상은 v2-f 모델 만 적절히 해석함을 알 수 있었다. 전반적인 온도요동의 크기와 주기를 적절하게 해석하기 위해서는 LES 방법의 사용이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract

Evaluation of turbulence models is performed for a better prediction of thermal stratification in an upper plenum of a liquid metal reactor by applying them to the experiment conducted at JNC. The turbulence models tested in the present study are the two-layer model, the $k-\omega$ model, the v2-f model and the low-Reynolds number differential stress-flux model. When the algebraic flux model or differential flux model are used for treating the turbulent heat flux, there exist little differences between turbulence models in predicting the temporal variation of temperature. However, the v2-f model and the low-Reynolds number differential stress-flux model better predict the steep gradient of temperature at the interface of thermal stratification, and only the v2-f model predicts properly the oscillation of temperature. The LES is needed for a better prediction of the amplitude and frequency of the temperature fluctuation.

1. 서론

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 즉 UIS 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 일본에서는 이 문제를 해결하기 위하여 많은 실험적 연구와 해석적 연구가 수행되어 왔다. 이들의 해석적인 연구를 종합하여 보면 수치해석상 대류항 처리법과 난류모델의 적절한 선택이 열성층 현상의 정확한 예측에 중요한 인자임을 보였다. 그러나 일본 JNC의 연구는 난류모델의 종류의 선택에 매우 제한적인 ($k-\epsilon$ 모델과 대수응력 및 열유속 모델) 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 여러 가지 실험들 중에 하나를 선택, 해석하여 난류모델들을 평가하고자 한다.

2. 지배방정식

난류유동과 열전달의 지배방정식은 기본적으로 연속방정식, 운동방정식과 에너지보존방정식으로 표현된다. 2차원, 원통좌표계에서 이들 지배방정식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(r\tilde{\rho})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(r\tilde{\rho}\tilde{U}) + \frac{\partial}{\partial y}(r\tilde{\rho}\tilde{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\tilde{\rho}\tilde{U}) + \frac{\partial}{\partial x}(r\tilde{\rho}\tilde{U}\tilde{U}) + \frac{\partial}{\partial y}(r\tilde{\rho}\tilde{V}\tilde{U}) = -r\frac{\partial\tilde{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(r\mu\frac{\partial\tilde{U}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(r\mu\frac{\partial\tilde{U}}{\partial y}\right) + \tilde{F}_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\tilde{\rho}\tilde{V}) + \frac{\partial}{\partial x}(r\tilde{\rho}\tilde{U}\tilde{V}) + \frac{\partial}{\partial y}(r\tilde{\rho}\tilde{V}\tilde{V}) = -r\frac{\partial\tilde{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(r\mu\frac{\partial\tilde{V}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(r\mu\frac{\partial\tilde{V}}{\partial y}\right) + \tilde{F}_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\tilde{\rho}\tilde{\Theta}) + \frac{\partial}{\partial x}(r\tilde{\rho}\tilde{U}\tilde{\Theta}) + \frac{\partial}{\partial y}(r\tilde{\rho}\tilde{V}\tilde{\Theta}) = \frac{\partial}{\partial x}\left(r\frac{\mu}{\text{Pr}}\frac{\partial\tilde{\Theta}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(r\frac{\mu}{\text{Pr}}\frac{\partial\tilde{\Theta}}{\partial y}\right) \quad (4)$$

위의 지배방정식을 직접적인 수치해석을 통하여 해를 구할 수 있으나 Reynolds 수가 크면 유동의 시간척도(time scale) 및 길이척도(length scale)가 너무 적기 때문에 많은 계산량을 요한다. 실제적인 공학적인 문제는 대부분 Reynolds수가 매우 크기 때문에 수치적 해석이 불가능하다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 Reynolds 평균법이 도입되었다. Reynolds 평균방법은 다음과 같이 유동의 변수 $\tilde{\Phi}$ 를 시간평균 Φ 와 요동 Φ' 로 분할한다.

$$\tilde{\Phi} = \Phi + \Phi' \quad (5)$$

$$\Phi = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} \tilde{\Phi} dt \quad (6)$$

위식에서 τ 는 난류요동의 시간척도보다 크나 평균유동의 비정상상태를 파악하기에는 충분히 적은 시간간격이다. 밀도의 변화는 온도요동에 의해서만 유발된다고 가정하고, 위의 지배방정식들, 식(1)-(4)를 위의 방법을 사용하여 평균하면 다음과 같다.

$$\frac{D}{Dt}(\rho) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) - \rho \beta g_i (\Theta - \Theta_{ref}) \quad (8)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \Theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \Theta}{\partial x_j} - \overline{\rho \theta u_j} \right) \quad (9)$$

시간평균의 결과로 운동방정식에는 \overline{uu} , \overline{uv} , \overline{vv} , \overline{ww} 등의 Reynolds 응력항들, 에너지방정식에는 $\overline{\theta u}$, $\overline{\theta v}$ 등의 난류열유속항들의 미지수가 생성되었다. 이들을 계산하기 위하여 난류모델이 필요한 것이다. 본 연구에서는 Two-layer 모델[3], $k-\omega$ 모델[3], $v2-f$ 모델[3] 및 저 레이놀즈수 미분응력 및 열유속 모델[2]을 평가하였다. 이들 모델에 대한 지배방정식들은 참고문헌 [1]에 잘 정리되어 있으므로, 본 논문에서는 저 레이놀즈수 미분응력 및 열유속 모델(SMC-PH)에 대한 지배방정식만 제시하고자 한다.

미분응력 및 열유속 난류모델(SMC-PH)에서의 연속방정식, 운동방정식 및 에너지방정식은 식(7)-(9)와 동일하다. 이 모델에서 연속방정식, 운동방정식 및 에너지방정식들을 제외한 난류변수들에 대한 방정식들은 아래와 같다.

$$\frac{D}{Dt}(\overline{\rho u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu \delta_{kl} + C_s \rho \overline{u_k u_l} \frac{k}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_l} \right] + (P_{ij} + G_{ij} + \Phi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij} + E_{ij}) \quad (10)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho\varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu \delta_{kl} + C_\varepsilon \overline{\rho u_k u_l} \frac{k}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} f_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} G_k) - \rho C_{\varepsilon 2} f_{\varepsilon 2} \varepsilon) + E_\varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{D}{Dt}(\overline{\rho \theta u_i}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\frac{1}{2} \left(\mu + \frac{\mu}{Pr} \right) \delta_{kl} + C_{\theta i} \overline{\rho u_k u_l} \frac{k}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{\theta u_i}}{\partial x_l} \right] + (P'_{i\theta} + P''_{i\theta} + G_{i\theta} + \Phi_{i\theta} + E_{i\theta}) \quad (12)$$

$$\frac{D}{Dt}(\overline{\rho \theta^2}) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} \delta_{kl} + C_{\theta\theta} \overline{\rho u_k u_l} \frac{k}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial x_l} \right] + (2P_\theta - 2\rho\varepsilon_\theta + E_\theta) \quad (13)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho\varepsilon_\theta) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} \delta_{kl} + C_{\varepsilon\theta} \overline{\rho u_k u_l} \frac{k}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial x_l} \right] + (C_{P1} P_\theta - C_{D1} \rho\varepsilon_\theta) \frac{\varepsilon_\theta}{\theta^2} + (C_{P2} P_k - C_{D2} \rho\varepsilon) \frac{\varepsilon_\theta}{k} \quad (14)$$

위 식들에서

$$f_{\varepsilon 1} = 1, \quad f_{\varepsilon 2} = 1 - \frac{2}{9} \exp \left[- \left(\frac{R_T}{6} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right), \quad P_k = \frac{1}{2} P_{kk} \quad (16)$$

$$G_{ij} = -\rho \beta (g_i \overline{\theta u_j} + g_j \overline{\theta u_i}), \quad G_k = \frac{1}{2} G_{kk} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij} = (1 - f_s) \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} + f_s \frac{\overline{u_i u_j}}{T}, \quad f_s = \frac{1}{1 + R_T / 10}, \quad R_T = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (18)$$

$$E_{ij} = \begin{cases} -2\mu \frac{\overline{u_i u_j}}{x_n^2}, & i = j \\ -2\mu \frac{\overline{u_i u_j} + \overline{u_i u_k n_k n_j} + \overline{u_j u_k n_k n_i} + \overline{u_k u_l n_k n_l n_i n_j}}{x_n^2}, & i \neq j \end{cases} \quad (19)$$

$$E_\varepsilon = -2\mu \frac{\varepsilon}{x_n^2} \exp(-0.5x_n^+), \quad x_n^+ = \frac{\rho U_\tau x_n}{\mu}, \quad U_\tau = \left(\frac{\mu}{\rho} \left| \frac{\partial U_P}{\partial x_n} \right|_w \right)^{1/2} \quad (20)$$

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij1} + \Phi_{ij2} + \Phi_{ij3} + \Phi_{ijw1} + \Phi_{ijw2} \quad (21)$$

$$\Phi_{ij1} = -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad (22)$$

$$\Phi_{ij2} = -C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij} \right) \quad (23)$$

$$\Phi_{ij3} = -C_3 \left(G_{ij} - \frac{2}{3} G_k \delta_{ij} \right) \quad (24)$$

$$\Phi_{ijw1} = -\rho C_{w1} \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_k u_m n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u_k u_i n_k n_j} - \frac{3}{2} \overline{u_k u_j n_k n_i} \right) \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon \Delta n} \quad (25)$$

$$\Phi_{ijw2} = -C_{w2} \left(\Phi_{km2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \Phi_{ik2} n_k n_j - \frac{3}{2} \Phi_{jk2} n_k n_i \right) \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon \Delta n} \quad (26)$$

$$P_{i\theta}^t = -\rho \overline{u_i u_k} \frac{\partial \Theta}{\partial x_k}, \quad P_{i\theta}^m = -\rho \overline{\theta u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}, \quad G_{i\theta} = -\rho \beta g_i \overline{\theta^2}, \quad P_\theta = -\rho \overline{\theta u_k} \frac{\partial \Theta}{\partial x_k} \quad (27)$$

$$E_{i\theta} = -\left(\frac{\mu}{\text{Pr}} + \mu \right) \frac{\overline{\theta u_i} + \overline{\theta u_k n_k n_i}}{x_n^2}, \quad E_\theta = -2 \frac{\mu}{\text{Pr}} \frac{\overline{\theta^2}}{x_n^2} \quad (28)$$

$$\Phi_{i\theta} = \Phi_{i\theta1} + \Phi_{i\theta2} + \Phi_{i\theta3} + \Phi_{i\theta w} \quad (29)$$

$$\Phi_{i\theta1} = -C_{\theta1} \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{\theta u_i} \quad (30)$$

$$\Phi_{i\theta2} = -C_{\theta2} P_{i\theta}^m \quad (31)$$

$$\Phi_{i\theta3} = -C_{\theta3} G_{i\theta} \quad (32)$$

$$\Phi_{i\theta w} = C_{\theta w} \Phi_{k\theta1} n_k n_i \frac{k^{3/2}}{C_l \varepsilon \Delta n} \quad (33)$$

$$C_s = 0.20, \quad C_\varepsilon = 0.15, \quad C_{\theta u} = 0.20, \quad C_{\theta\theta} = 0.22, \quad C_{\varepsilon\theta} = 0.22 \quad (34)$$

$$C_{\varepsilon1} = 1.35, \quad C_{\varepsilon2} = 1.80, \quad C_{\varepsilon3} = 1. \quad (35)$$

$$C_1 = 2.2, \quad C_2 = 0.55, \quad C_3 = 0.55, \quad C_{w1} = 0.6, \quad C_{w2} = 0.3, \quad C_l = 2.53 \quad (36)$$

$$C_{\theta1} = 3.75, \quad C_{\theta2} = 0.5, \quad C_{\theta3} = 0.5, \quad C_{\theta w} = 0.2 \quad (37)$$

$$C_{P1} = 1.8, \quad C_{P2} = 0.72, \quad C_{D1} = 2.2, \quad C_{D2} = 0.8 \quad (38)$$

3. 평가대상 문제

본 연구의 해석대상은 일본 JNC에서 수행한 열성층 실험 중 한 경우이다. 실험장치와의 대략적인 모형은 그림 1에 도식화되어 있다. 물을 작동유체로 사용하였으며, 입구온도는 10초 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.

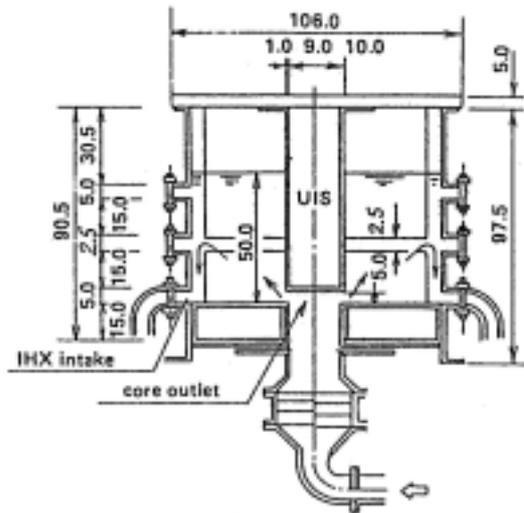


그림 1 JNC 열성층 물모의 실험장치

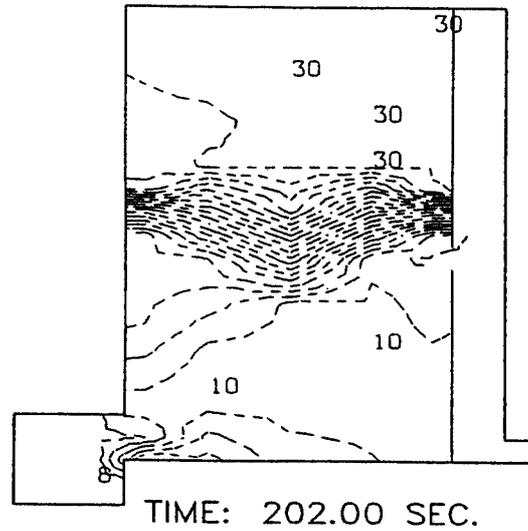
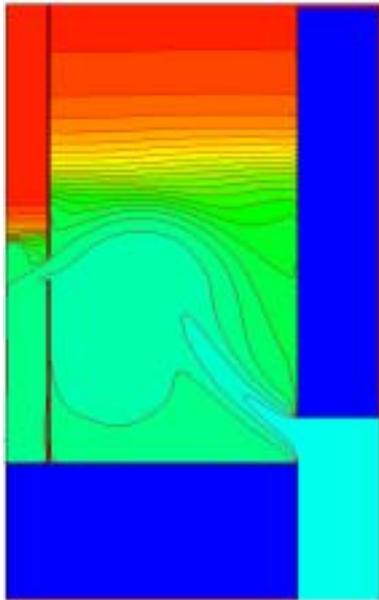


그림 2 JNC 실험 등온선 분포

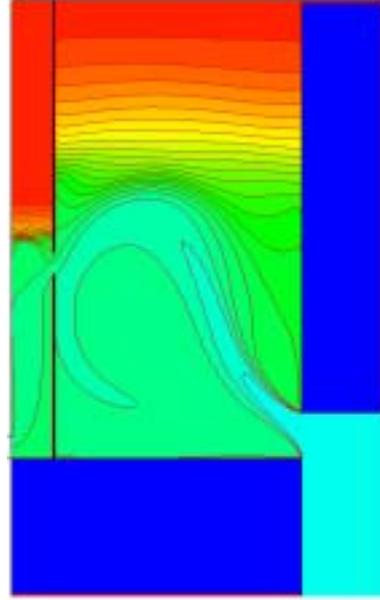
4. JNC 열성층 실험 해석

열성층 현상에 대한 난류모델을 평가하기 위하여 일본 JNC에서 수행한 실험 중 1개를 선택하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 수치격자는 187(축방향)×112(반경방향)이다. 시간간격 0.1초를 사용하여 400초까지 계산을 수행하였다. Two-layer 모델과 $k-\omega$ 모델은 대수열유속모델[4]을 사용하여도 수렴이 잘 되었으나, $v2-f$ 모델은 대수열유속 모델을 사용할 경우 수렴이 되지 않아서, 대신 미분열유속 모델을 사용하였다.

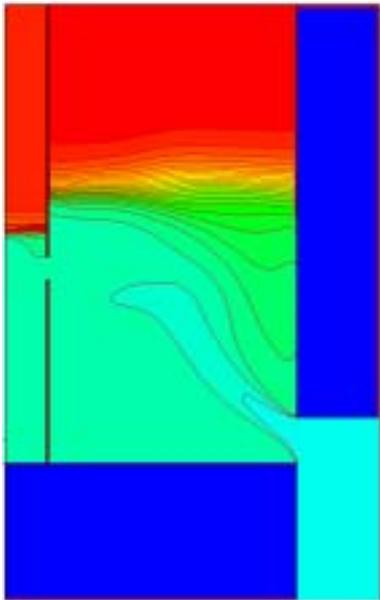
그림-2는 JNC 열성층 실험에서의 202초 후 고온 풀에서의 등온선 분포를 보여주고 있다. 그림 3 (a)-(d)는 4개의 서로 다른 난류모델에 의해 계산된 202초 후 고온 풀에서의 등온선의 분포를 보여주고 있다. 모든 모델들에 의한 계산결과는 실험의 결과와 매우 유사함을 관찰할 수 있다. 다만 $v2-f$ 모델과 SMC-PH 모델이 two-layer 모델이나 $k-\omega$ 모델보다 열성층 경계면 (interface)에서 실험결과에서 관찰되는 급격한 온도구배의 분포를 좀 더 정확하게 예측함을 관찰 할 수 있다.



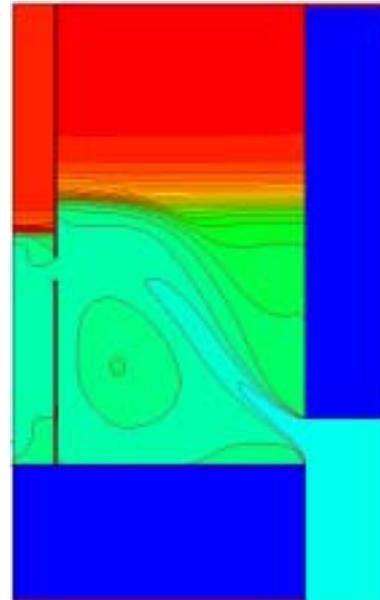
(b) two-layer model



(c) $k-\omega$ model

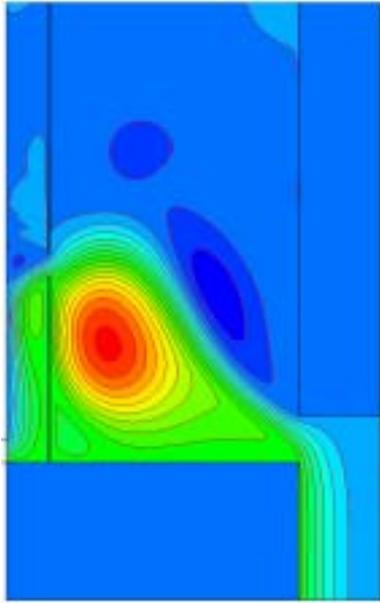


(d) v_2-f model

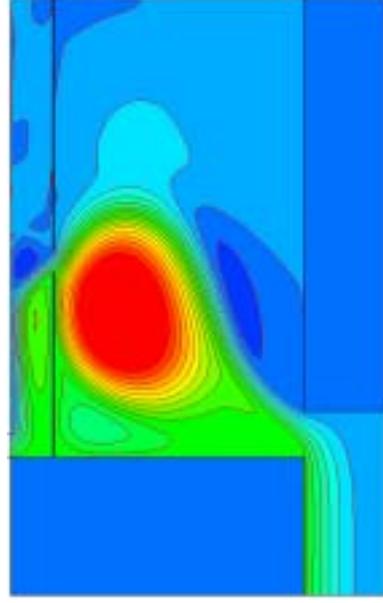


(e) SMC-PH model

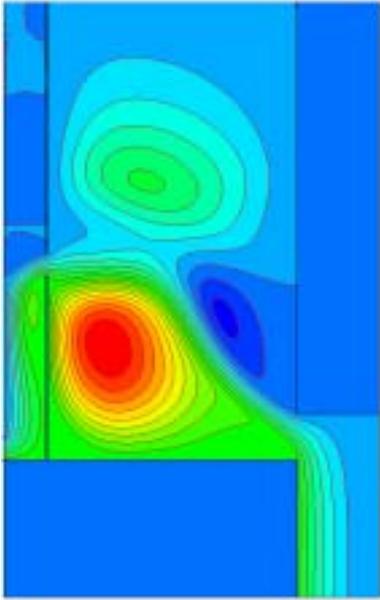
그림 3 각 난류모델에 의해 계산된 200초 후 등온선 형태



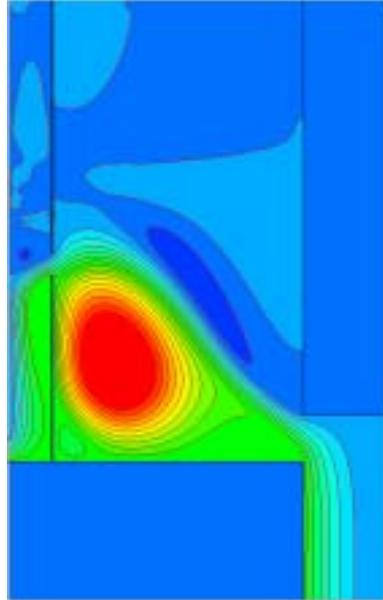
(a) two-layer model



(b) $k-\omega$ model



(c) v_2-f model



(d) SMC-PH model

그림 4 각 난류모델에 의해 계산된 200초 후 유선 형태

그림-4-(a)-(d)는 202초 후 고온 풀에서의 4개의 서로 다른 난류모델에 의해 계산된 유선의 분포를 보여주고 있다. 그림 3에서 관찰된 등온선의 분포와 그 경향이 일치한다. Two-layer 모델이나 $k-\omega$ 모델의 계산결과 의 경우 유동의 열혼합이 비교적 잘 이루어져 $v2-f$ 모델과 SMC-PH 모델 보다 찬 온도의 유동이 위쪽으로 좀더 침투함을 관찰 할 수 있다.

그림 5는 JNC 실험에서 온도를 시간에 따라 monitoring 한 지점들을 보여주고 있다. 그림 6 (a)-(l)는 난류모 델들에 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 $v2-f$ 모델을 제외한 난류모델들은 온도의 요동 (temperature fluctuation) 현상을 적절히 모사하지 못함을 알 수 있다. 이것은 열성층 현상 해석 시 시간평균의 방법을 사용하는 난류모델 보다 난류에 의한 요동 현상을 적절히 모사하는 LES의 방법의 사용이 권장됨을 보여주고 있다.

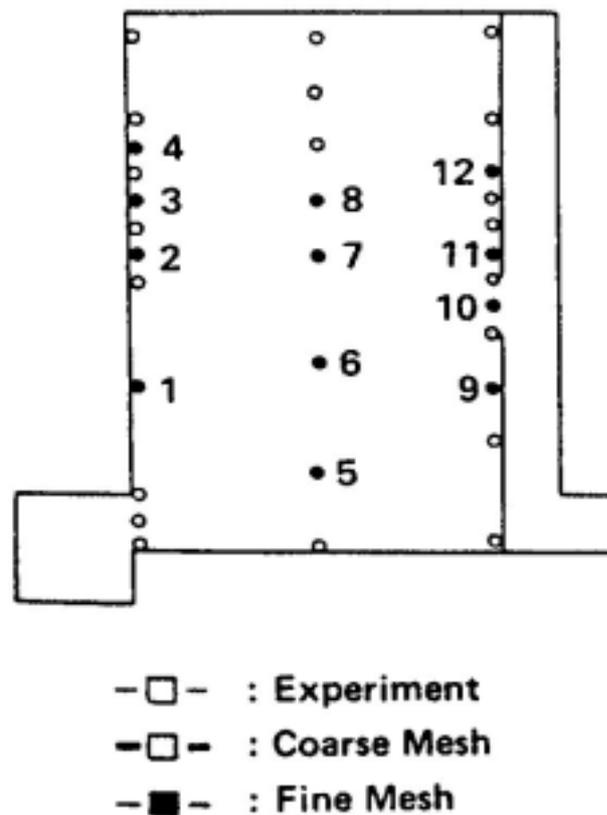
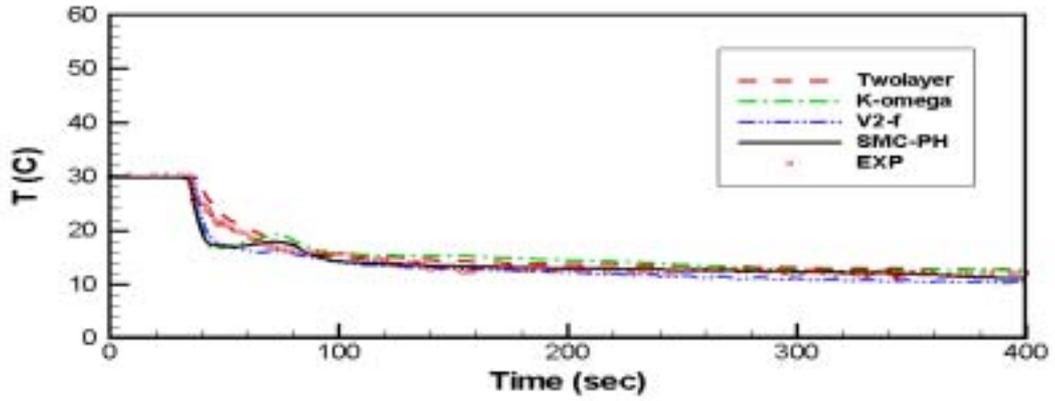
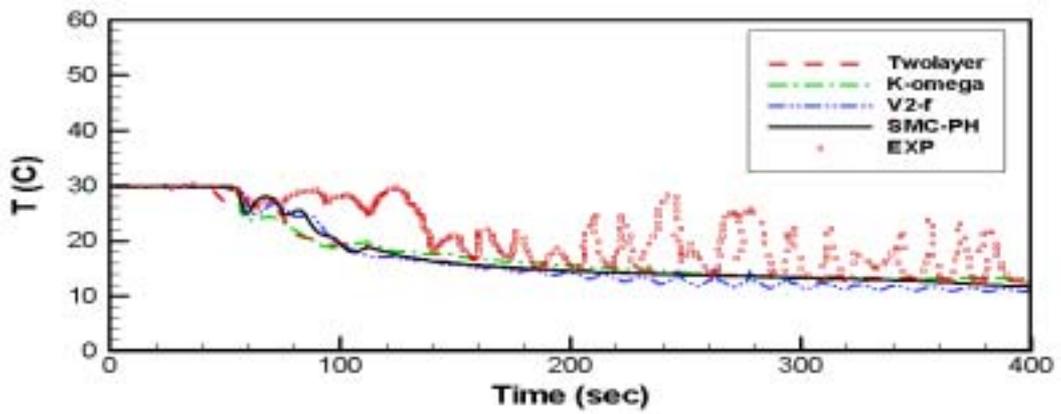


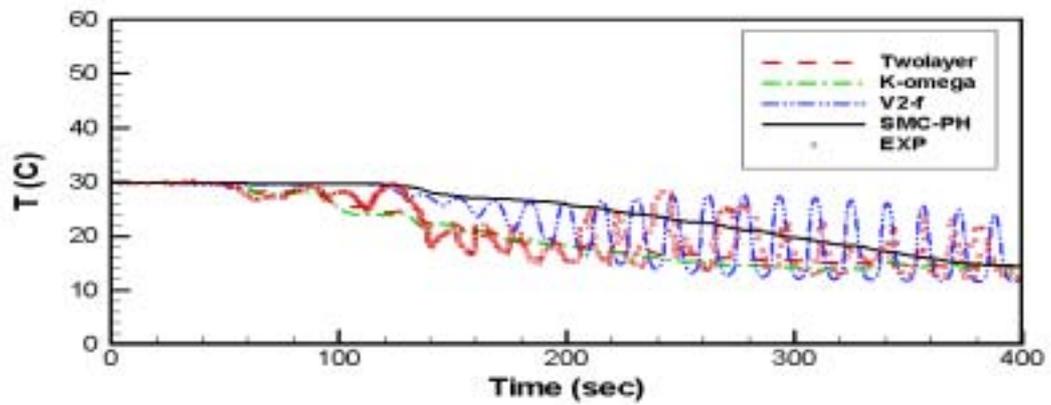
그림 5 JNC 실험에서 온도 monitoring 지점들



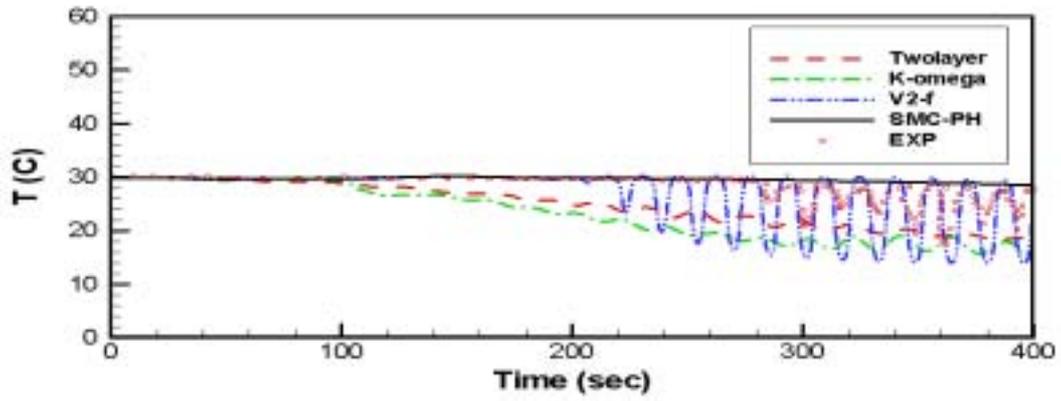
(a) 지점 1에서의 시간에 따른 온도변화



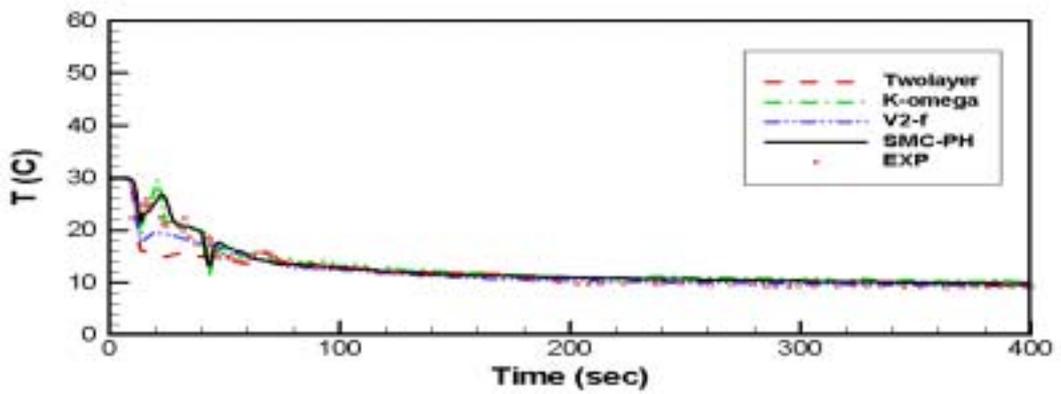
(b) 지점 2에서의 시간에 따른 온도변화



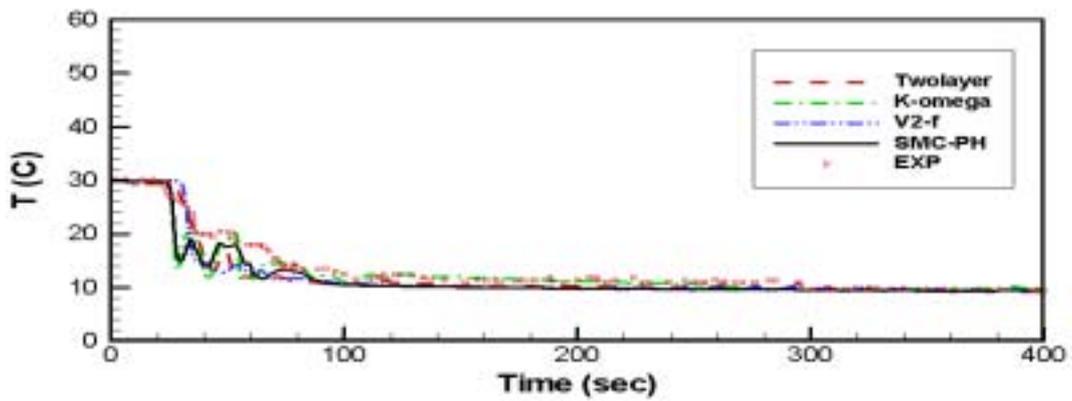
(c) 지점 3에서의 시간에 따른 온도변화



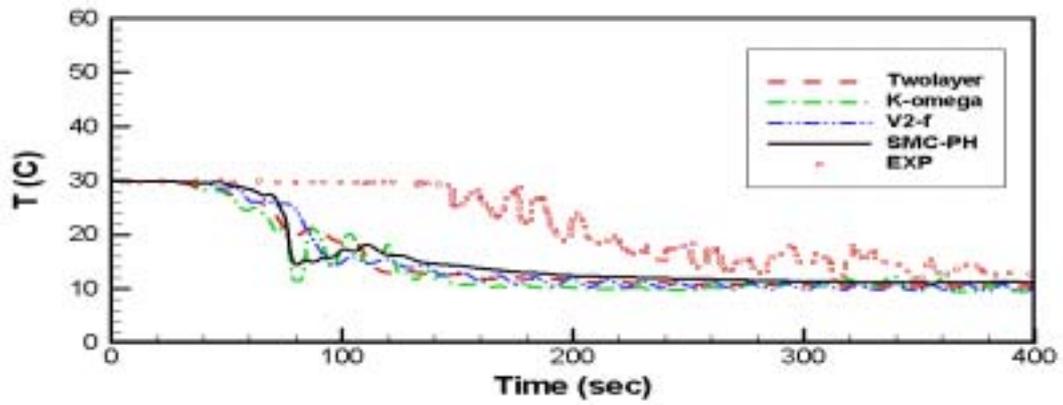
(d) 지점 4에서의 시간에 따른 온도변화



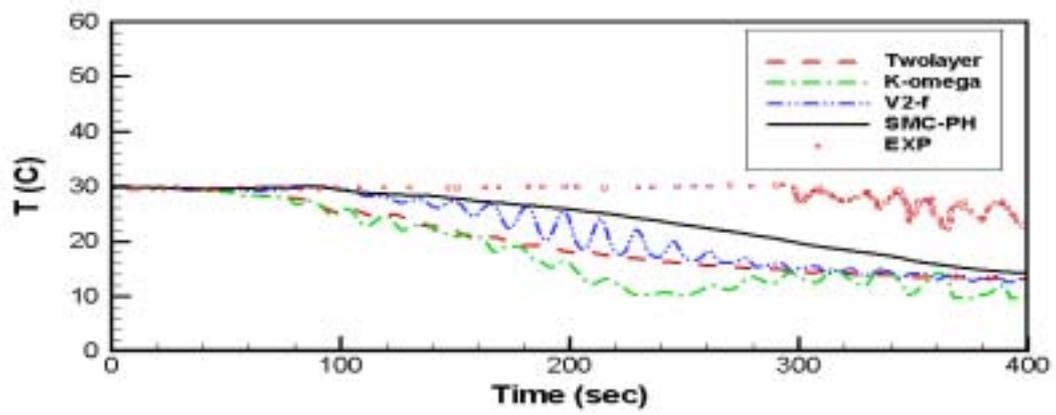
(e) 지점 5에서의 시간에 따른 온도변화



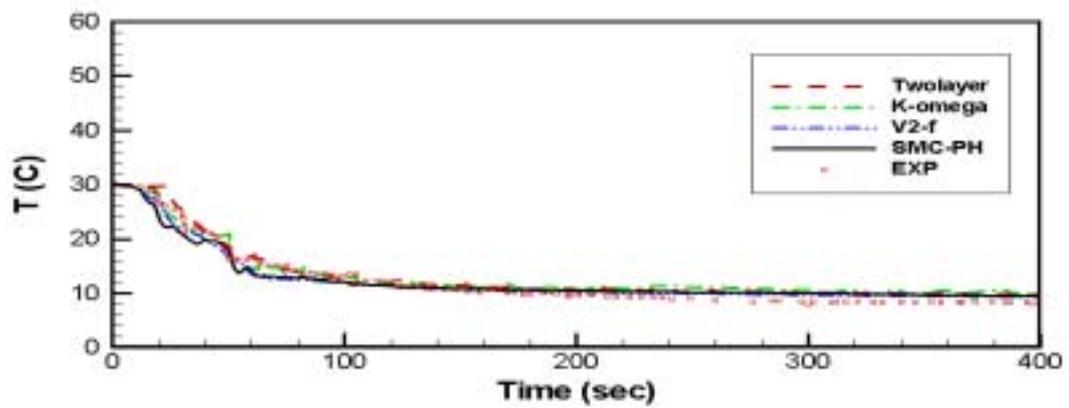
(f) 지점 6에서의 시간에 따른 온도변화



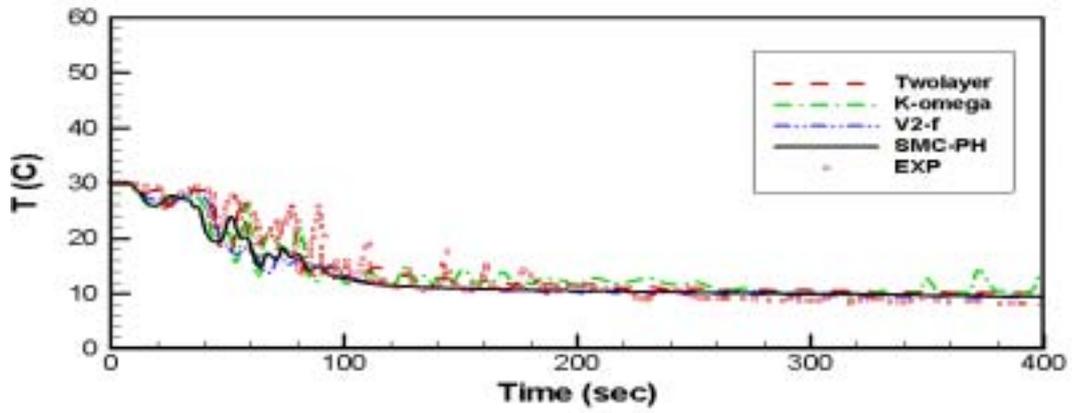
(g) 지점 7에서의 시간에 따른 온도변화



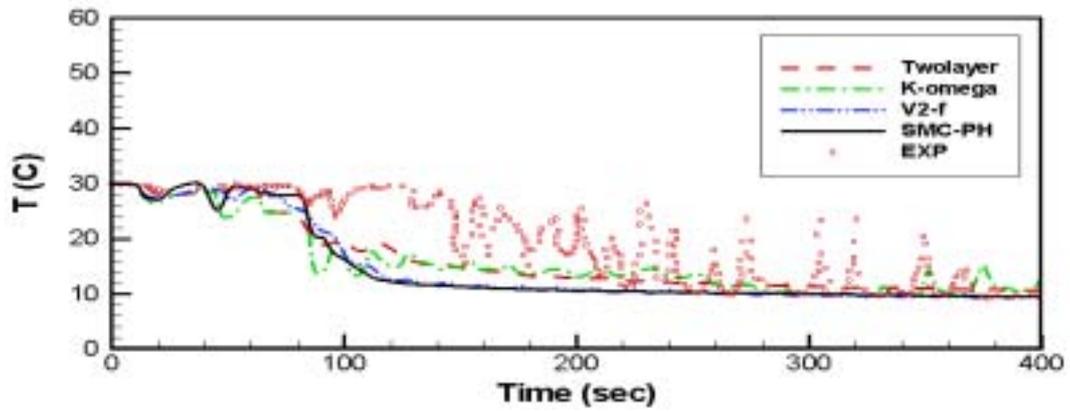
(h) 지점 8에서의 시간에 따른 온도변화



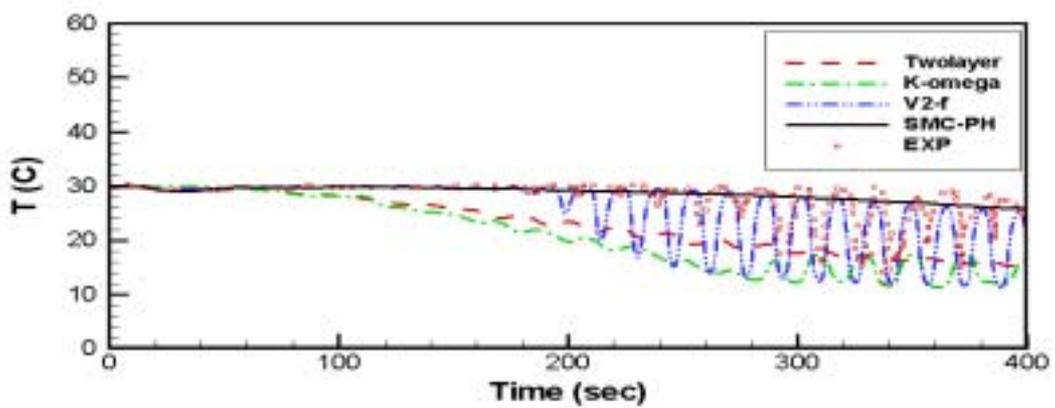
(i) 지점 9에서의 시간에 따른 온도변화



(j) 지점 10에서의 시간에 따른 온도변화



(k) 지점 11에서의 시간에 따른 온도변화



(l) 지점 12에서의 시간에 따른 온도변화

그림 6 각 난류모델에 의하여 계산된 각 monitoring 지점에서의 시간에 따른 온도변화

7. 결론

본 연구에서는 최근에 널리 사용되고 있는 난류모델의 수식들을 공식화하였으며, 열성층 문제에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 평가대상 난류모델은 two-layer 모델, $k-\omega$ 모델, v2-f 모델 및 저 Reynolds 수 미분 응력 및 열유속 모델 (SMC-PH)이다. 난류열유속을 모델 할 경우, two-layer 모델 및 $k-\omega$ 모델은 대수열유속 모델(AFM)을 사용하였고, v2-f 모델인 경우 대수열유속 모델을 사용하면 수렴이 되지 않아 미분열유속 모델을 사용하였다. 일본 JNC의 열성층 실험을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

열성층 해석 시 대수열유속 모델이나 미분열유속 방법을 사용하면 각 난류모델간의 시간에 따른 온도변화의 예측에는 큰 차이는 없으나, v2-f 모델과 SMC-PH 모델이 열성층 경계면에서의 급격한 온도구배를 좀더 정확하게 모사하고, 온도의 요동현상은 v2-f 모델 만 적절히 해석함을 알 수 있었다. 전반적인 온도요동의 크기를 해석하는 데는 LES 방법의 사용이 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 최석기, "열성층유동 난류모델 평가서" 한국원자력연구소 액체금속로 설계개발 과제 작업보고서, LMR/FS200-AR-03-Rev.0/03, 2003.
2. Peeters, T. W. J. Henkes, R. A. W. M., "The Reynolds-stress model of turbulence applied to the natural-convection boundary layer along a heated vertical plate", Int. J. Heat Mass Transfer, 35, pp. 403-420, 1992.
3. Medic, G and Durbin, P. A., "Toward improved prediction of heat transfer on turbine blades", J. Turbomachinery, 124, pp. 187-192, 2002.
4. Kenjeres, S., "Numerical modelling of complex buoyancy-driven flows", Ph.D thesis, Technical University of Delft, Netherlands, 1998.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.