

Thermal Stratification 해석 난류모델 평가

최 석 기^{*1}, 위 명 환^{*2}, 김 성 오^{*1}

Evaluation of Turbulence Models for Analysis of Thermal Stratification

Seok-Ki Choi, Myung-Hwan Wi and Seong-O Kim

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.

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

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 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 대류항처리법과 난류모델의 적절한 선택이 열성층 현상의 정확한 예측에 중요한 인자임을 보였다. 그러나 일본 JNC의

*1 정회원, 한국원자력연구소, 유체공학연구부

*2 한국원자력연구소, 유체공학연구부

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

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 난류 모델을 평가하고자 한다. 국내에서는 아직까지 액체 금속로 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. 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 난류요동 값을 나타낸다. 일반적으로 $\langle \Phi \rangle$ 를 ensemble average 값이라 부른다. 지배방정식들을 위의 방법을 사용하여 평균하면 다음과 같다.

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

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

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

여기 부터는 $\langle u_i \rangle = U_i$, $\langle P \rangle = P$, $\langle u_i' u_j' \rangle = \overline{u_i u_j}$ 와 $\langle T \rangle = \Theta$, $\langle T' u_j' \rangle = \overline{\theta u_j}$ 로 표시한다. 시간평균의 결과로 운동방정식에는 \overline{uu} , \overline{vv} , \overline{ww} , \overline{uv} 등의 레이놀

즈 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], $k-\omega$ 모델[2], v2-f 모델[3] 및 저 레이놀즈수 미분 응력 및 열유속 모델[4]을 평가하였다. 이들 모델에 대한 지배방정식들은 참고문헌 [5]에 잘 정리되어 있으므로, 본 논문에서는 저 레이놀즈수 미분 응력 및 열유속 모델(SMC-PH)에 대한 지배방정식만 제시하고자 한다.

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.

$$U = 0, V = V_{in} \quad (6)$$

$$\overline{uu}_{in} = \overline{vv}_{in} = \overline{ww}_{in} = \frac{2}{3} k_{in}, \overline{uv}_{in} = 0, \epsilon = \epsilon_{in} \quad (7)$$

$$\Theta = \Theta_{in}, \overline{\theta u}_{in} = \overline{\theta v}_{in} = 0 \quad (8)$$

$$k_{in} = 1.5 \times (0.037 U_{in})^2, \epsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / (0.3D) \quad (9)$$

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 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.

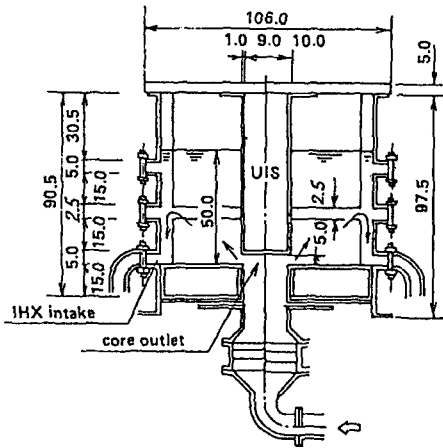


Fig. 1 JNC 열성층 물모의 실험장치

3.2 계산결과 토의

열성층 현상에 대한 난류모델을 평가하기 위하여 일본 JNC에서 수행한 실험 중 1개를 선택하여 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 수치격자는 187(축방향)X112(반경방향)이다. 시간간격 0.1초를 사용하여 400초까지 계산을 수행하였다. Two-layer 모델과 $k-\omega$ 모델은 대수열유속모델을 사용하여도 수렴이 잘 되었으나, v2-f 모델은 대수열유속 모델을 사용할 경우 수렴이 되지 않아서, 대신 미분열유속 모델을 사용하였다.

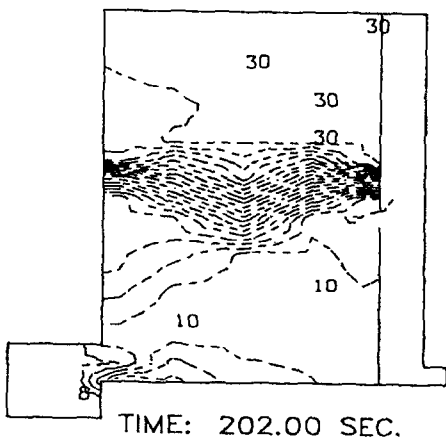


Fig. 2 JNC 실험 등온선 분포

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 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 관찰할 수 있다.

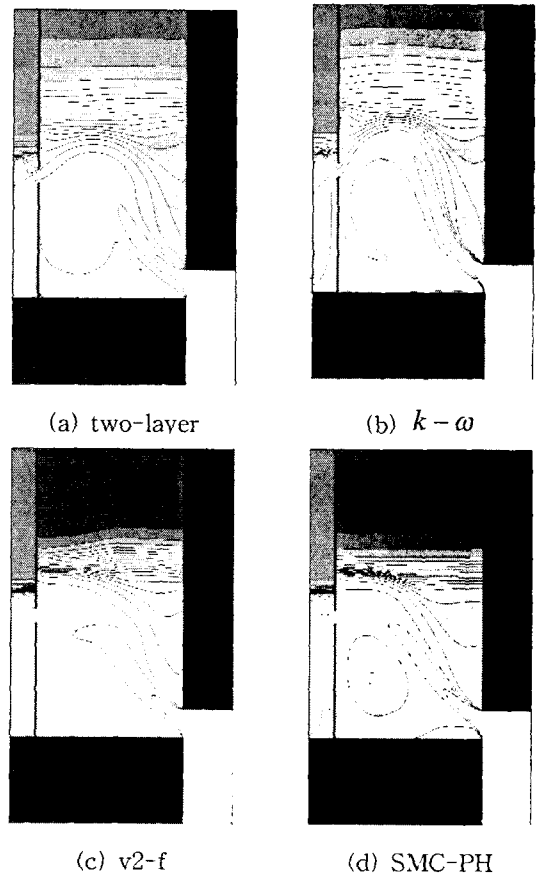


Fig. 3 200초 후 등온선 형태

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 $k-\omega$ 모델의 계산결과의 경우 유선의 연흔합이 비교적 잘 이

루어져 v2-f 모델과 SMC-PH 모델 보다 찬 온도의 유동이 위쪽으로 좀더 침투함을 관찰 할 수 있다.

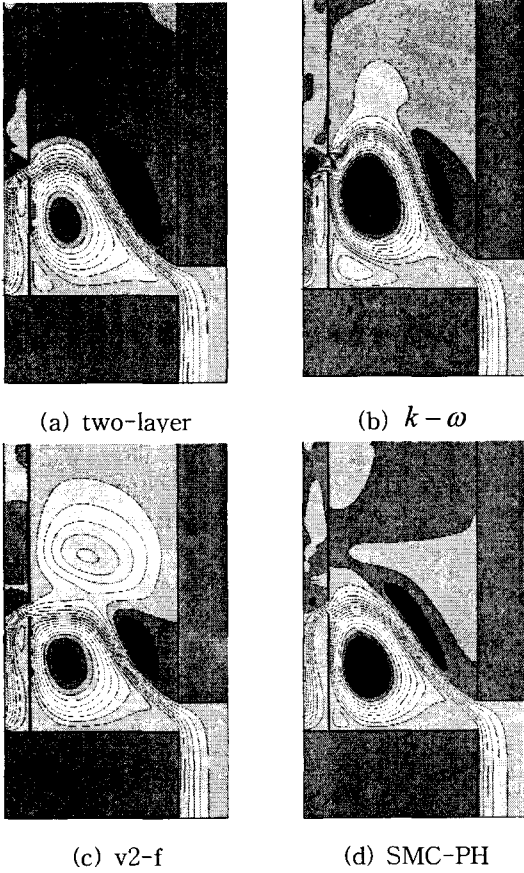
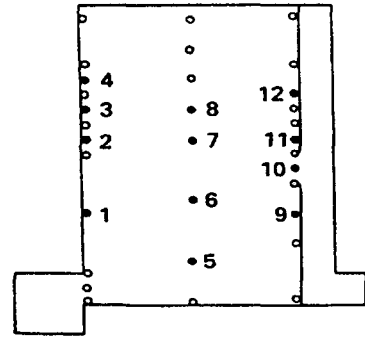


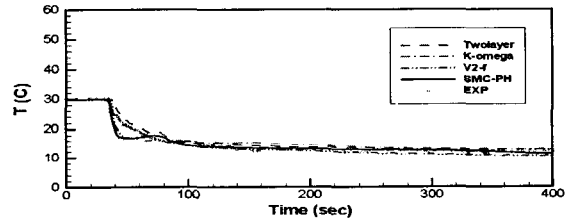
Fig. 4 200초 후 유선 형태

Fig. 5는 JNC 실험에서 온도를 시간에 따라 monitoring 한 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 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 요동현상을 적절히 모사하는 LES의 방법의 사용이 권장됨을 보여주고 있다

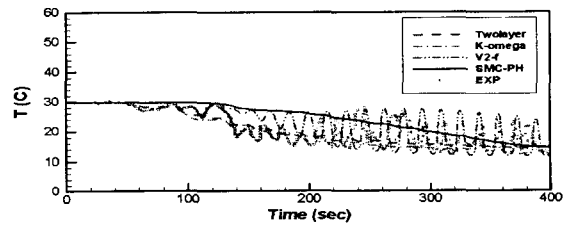


- : Experiment
- : Coarse Mesh
- : Fine Mesh

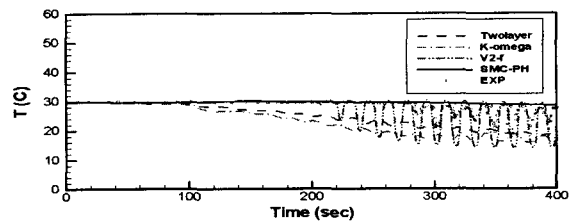
Fig. 5 온도 monitoring 지점들



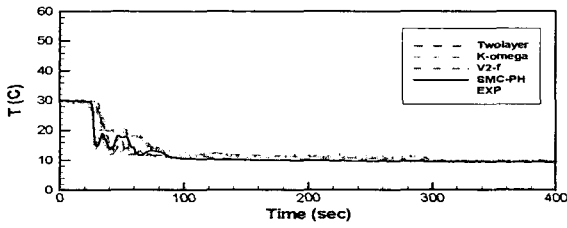
(a) 지점 1



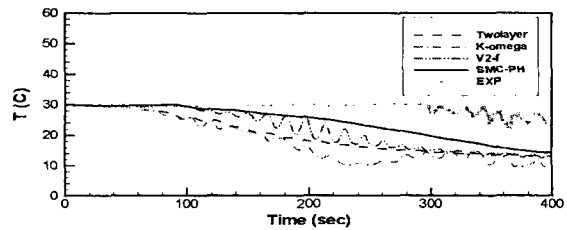
(b) 지점 3



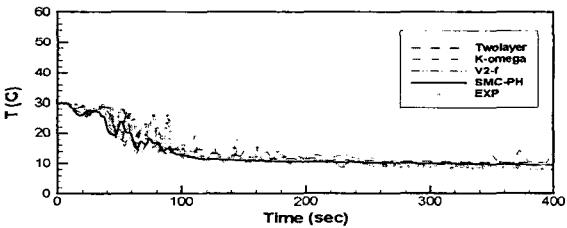
(c) 지점 4



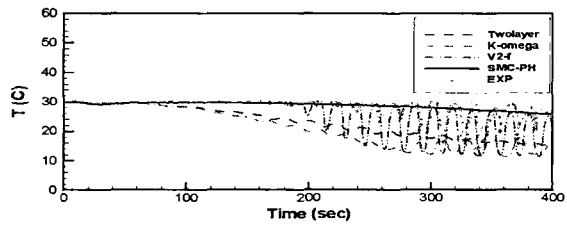
(d) 지점 6



(e) 지점 8



(f) 지점 10



(g) 지점 12

Fig. 6 각 monitoring 지점에서의 시간에 따른 온도 변화

4. 결 론

본 연구에서는 최근에 널리 사용되고 있는 난류모델의 수식들을 공식화하였으며, 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.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 증강기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- [1] Chen, H.C. and Patel, V.C., "Near-wall turbulence models for complex flows including separation," *AIAA J.*, Vol.26, (1988), p.641-648.
- [2] Medic, G and Durbin, P.A., "Toward improved prediction of heat transfer on turbine blades," *J. Turbomachinery*, Vol.124, (2002) p.187-192.
- [3] Durbin, P.A., "Separated flow computations with the $k-\epsilon-\overline{v^2}$ model," *AIAA J.*, Vol.33, (1995), p.659-664.
- [4] Peeters, T.W.J. and 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*, Vol.35, (1992), p. 403-420..
- [5] 최석기, "열성층유동 난류모델 평가서" 한국원자력연구소 액체금속로 설계개발 과제 작업보고서, LMR/FS200-AR-03-Rev.0/03, (2003)..