

Thermal Striping 해석 난류모델 평가

최 석 기^{*1}, 남 호 윤^{*2}, 위 명 환^{*2}, 어 재 혁^{*2}, 김 성 오^{*1}

Evaluation of Turbulence Models for Analysis of Thermal Striping

Seok-Ki Choi, Ho-Yun Nam, Myung-Hwan Wi, Jae-Hyuk Eoh and Seong-O Kim

A numerical study of evaluation of turbulence models for thermal striping phenomenon is performed. The turbulence models chosen in the present study are the two-layer model, the shear stress transport (SST) model and the V2-f model. These three models are applied to the analysis of the triple jet flow with the same velocity but different temperature. The unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equation method is used together with the SIMPLE algorithm. The results of the present study show that the temporal oscillation of temperature is predicted only by the V2-f model, and the accuracy of the mean velocity, the turbulent shear stress and the mean temperature is a little dependent on the turbulence model used. The the two-layer model and the SST model shows nearly the same capability of predicting the thermal striping and the amplitude of the temperature fluctuation is predicted best by the V2-f model.

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

1. 서 론

온도가 다른 두 유동이 혼합하여 온도요동을 일으키고 고체물체에 열피로 현상을 유발하는 것을 thermal striping 현상이라고 한다. 액체금속로 상부에는 노심의 농축도의 차이 및 제어봉 집합체와 연료봉 집합체간의 온도차이 등으로 불규칙한 온도요동 특성을 형성하여 노심상부 구조물에 열피로 현상을 유발한다. 유동장에서 발생하는 온도의 요동변화 특성은 경계면을 통하여 구조재로 전달되는 열전달의 크기를 결정하게 되는데 주요한 영향인자는 온도요동의 크기와 주파수인 것으로 규명되고 있다. 온도요동 주파수가 비교적 적은 경우에는 인접한 구조재에 열전달 특성이 전달될 수 있는 충분한 시간이 제공되므로 이러한 저 주파수의 온도변화 특성이 그

크기, 즉 진폭이 큰 지점에서는 구조재의 온도변화를 현저하게 일으킬 수 있다고 알려져 있다. 따라서 이러한 현상을 올바르게 분석하는 것은 thermal striping 현상을 미연에 방지하여 가능한 열피로의 발생을 차단할 수 있는 설계를 수행하는 선결요건이 된다. Thermal striping은 고온의 유체와 저온의 유체가 혼합되는 배관에서도 발생할 수 있다. 실제로 프랑스 액체금속로 Phenix에서 고온의 유체가 통과하는 배관이 저온의 유체가 통과하는 주배관(main pipe)에 접속되는 T자 연결부 근방에서 thermal striping에 의한 과도한 열응력으로 피로파단이 발생하는 사례가 있었다. 그러므로 thermal striping 현상을 이해하고 이에 대처하는 설계지침서를 마련하는 것은 액체금속로 설계의 구조적 건전성을 확보하는데 매우 중요하다.

*1 정희원, 한국원자력연구소, 유체공학연구부

*2 한국원자력연구소, 유체공학연구부

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

Thermal striping 현상을 이해하기 위하여 많은 실험적 및 수치적 연구가 수행되어 왔다. 실험적 연구는 주로 일본의 JNC에서 수행되었으며, 작동유체

로는 소류, 공기 및 물을 사용하여 액체금속로 노심 출구에서의 모양을 간단하게 모사한 double jet, triple jet 및 동심 환형 jet에 대한 실험을 수행하여 thermal striping 현상을 규명할 수 있는 실험자료를 축적하여 왔다. 실험적으로 실제적인 액체금속로 노심 출구에서의 형상을 모사하여 실험을 수행하는데는 많은 예산이 필요하므로 thermal striping 현상을 수치적으로 규명하는 노력이 일본 및 프랑스 등에서 수행되어 왔다. 수치해석을 통하여 thermal striping 현상을 파악하는 방법으로 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation), LES (Large Eddy Simulation) 및 DNS (Direct Numerical Simulation) 방법을 사용하였다.

Thermal striping 현상을 분석하기 위해서는 첫째로 전체 유동장의 특성을 파악하고, 둘째로 고체면으로의 열전달 특성을 지배하는 온도의 시간함수를 확보해야하는 두 가지 중요한 요소를 만족할 수 있는 방법론이 필요하다. 첫째, 정상상태 전체유동장의 유동특성 파악은 난류모델을 사용하여 신뢰성 있고 신속한 예측을 수행할 수 있으며, 계산된 온도요동 진폭의 정확성은 사용된 난류모델의 정확성에 의존된다. 그러나 이 방법은 thermal striping 현상의 주요 인자인 온도요동의 주파수를 정확하게 구할 수 없다는 단점이 있다. 둘째, 온도변화의 주파수와 진폭을 도출할 수 있는 시간에 따른 온도의 함수관계를 구하기 위하여 LES를 이용한 해석 방법을 사용하고 있다. 그러나 실제 원자로부터의 LES방법의 적용은 과도한 컴퓨터용량을 필요로 하므로 아직까지 적용되지 않고 있다. 그러므로 URANS (Unsteady Reynolds Average Navier-Stokes equation) 방법을 사용하여 thermal striping 현상을 적절히 모사할 수 있는지 파악하는 것은 실제적인 액체금속로에서의 thermal striping 현상을 규명하는데 중요한 연구가 될 것이다.

본 연구에서는 URANS 방법을 사용하여 thermal striping 현상을 해석할 때 난류모델의 선택이 해의 정확성과 수렴성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 평가대상 난류모델로는 Two-layer 모델[1], SST 모델[2] 및 V2-f 모델[3] 이다. 해석대상 실험은 한국 원자력연구소에서 수행한 실험 중 한 경우인 Triple-Jet 실험이다[4]. 계산결과를 실험결과와 비교하여

URANS 방법을 사용할 때 난류모델의 선택이 온도요동의 진폭에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 수학적 공식화

2.1 지배방정식

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

$$\Phi = \bar{\Phi} + \tilde{\Phi} + \Phi' \tag{1}$$

$$\Phi = \langle \Phi \rangle + \Phi' \tag{2}$$

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.

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

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

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

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 레이놀즈 응력항들, 에너지방정식에는 $\overline{\Theta u}$, $\overline{\Theta v}$ 등의 난류 열유속항들의 미지수가 생성되었다. 이들을 계산하기 위하여 난류모델이 필요한 것이다. 본 연구에서 사용한 난류모델에 대한 상세한 설명은 참고문헌 [5]에 기록되어 있다.

2.2 경계조건

경계조건은 원자력연구소에서 난류모델 평가를 위해 특별히 개발한 FLOW-2D 코드에서 제공하는 경

계조건을 사용하였다. 벽면에서는 no slip 조건과 단열조건을 사용하였고, 입구에서는 다음과 같은 입구조건을 사용하였다.

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

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

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

$$k_{in} = 0.005U_{in}^2, \varepsilon_{in} = \frac{C_{\mu}^{0.75} k_{in}^{1.5}}{0.09D}, C_{\mu} = 0.09 \quad (9)$$

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.

2.3 수치적 방법

수치적 방법으로는 잘 알려진 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 대류항 처리법으로는 고차유계해법인 HPLA[6]해법을 사용하였다. 비균일 167×142 격자를 사용하여 계산을 수행하였으며, 비정상항은 Eluer의 방법으로 처리하였고, 시간간격은 0.00005초를 사용하였다. 총 100,000 시간전진 동안 계산을 수행하였다. 처음 80,000번 시간전진 동안 각 시간구간마다 수렴된 결과를 얻은 다음, 마지막 20,000번 시간전진 동안 수렴된 해를 사용하여 시간평균 값과 RMS(root-mean-square) 값을 구하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 해석대상 문제

해석대상 문제는 한국원자력연구소에서 수행한 thermal striping 실험들[4] 중 한 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 한국원자력연구소에서는 thermal striping 현상에 대한 난류모델 및 LES 방법론을 검증하기 위하여 온도와 속도를 변화해 가며 double 및 triple jet 등의 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 이들 중 한 경우인 triple jet에 대한 계산을 수행하였다. Triple jet 실험에 대한 대략적인 실험부는

Fig.1에 도식화되어 있다. 작동유체로 공기를 사용하였으며, 공기의 입구온도는 중앙 nozzle은 65℃, 다른 두 side nozzle들은 41℃이고, hot 및 cold nozzle을 통과하는 공기의 속도는 10m/s이다.

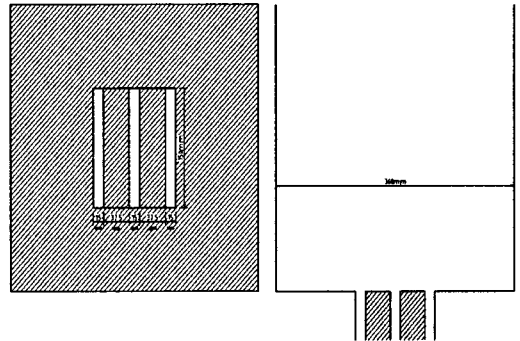


Fig.1 Top view (left) and front view (right) of the test section

3.2 계산결과 토의

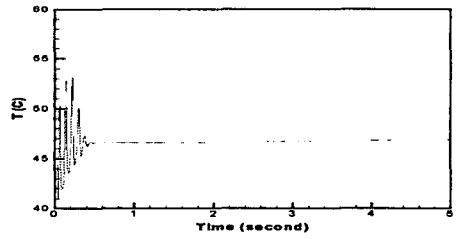
Fig.1에서 보는 바와 같이 측정부위를 지나기 전에 공기가 주입되는 직사각형 모양의 통로가 있다. 이 곳에서 유체의 발달과정이 전체 해에 미치는 영향을 고려하여 별도의 계산을 수행하였다. 이 때 사용한 경계조건이 Eqs.(6)-(9)이다. 이 별도의 계산결과를 실제 해석에서의 입구조건으로 사용하였다.

Fig.2는 계산영역의 한 monitoring 지점 ($x=-25\text{mm}$ from center, $y=223\text{mm}$)에서 각 난류모델들을 사용하여 계산된 온도의 시간에 따른 변화를 실험결과와 함께 보여주고 있다. 우리는 Two-layer 모델과 SST 모델은 온도의 요동현상을 적절히 해석하지 못하고 정상상태(steady state)의 해를 산출함을 관찰할 수 있다. V2f 모델은 일정한 정상상태 후 비정상상태 해를 산출함을 관찰할 수 있으나 온도요동의 진폭(amplitude)과 주기(frequency)가 실험결과와 많은 차이가 있다. 여기에서 주의 할 사항은 계산에서 사용한 시간간격(0.00005초)이 실험에서 측정할 때 사용한 시간간격(0.00025초)보다 적다는 것이다. 그러므로 실험의 결과를 계산의 시간간격에 맞게 적분할 필요가 없다. 즉 난류모델들이 온도의 요동현상을 적절하게 해석하지 못하는 것이다. 그러나 LES나 DNS 와 같이 URANS 계산 시 입구에서의 온도요동현상을 적절히 사용하고, 3차원으로 계산하면 해의

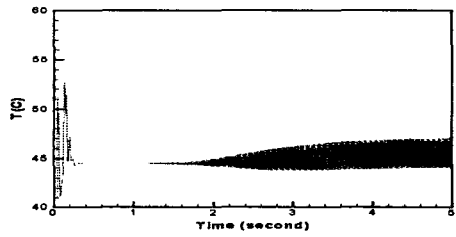
정확성이 증가할 것이나, 본 연구에서는 일반적인 URANS 방법을 사용하였다.

Fig.3은 각 난류모델을 사용하여 계산된 속도의 시간평균 값을 실험의 결과와 비교한 것을 보여주고 있다. 입구 근처에서는 수직방향 속도성분을 모든 난류모델이 적절히 해석하나, 입구역역을 조금 지나서는 약간의 차이가 있다. 이것은 각 난류모델들이 이 영역에서 유동의 혼합현상을 적절히 모사하지 못하기 때문인 것으로 추정된다. 이 영역에서는 난류모델 간의 차이는 거의 없다. 후류영역에서는 각 난류모델들이 비교적 정확히 해석하나 Two-layer모델과 SST 모델이 V2-f 모델보다 약간 더 정확히 해석함을 관찰할 수 있다.

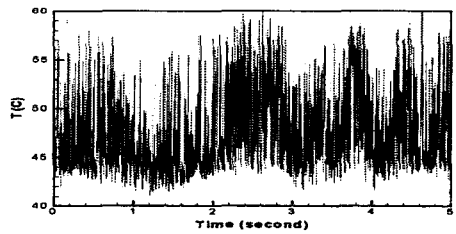
Fig.4는 각 난류모델을 사용하여 계산된 난류 전단응력의 값을 실험의 결과와 비교한 것을 보여주고 있다. 난류 전단응력은 난류의 혼합현상을 지배하는 중요한 인자이다. Fig.4에서 관찰할 수 있는 바와 같이 입구 근처에서는 난류전단응력을 모든 난류모델이 적절히 해석하나, 입구역역을 조금 지나서는 많은 차이가 있다. 양쪽 가장자리에서의 난류 전단응력의 이상한 분포는 실험data의 오류 때문인 것으로 추정된다. Fig.3에서 수직방향의 속도성분들이 비교적 정확하게 예측된 것을 참고로 하면, 실험에서 수평방향의 속도성분을 정확하게 측정하지 못하여 발생한 것으로 추정된다. 이러한 현상이 하류영역까지 지속되는 것을 관찰할 수 있다. 전반적으로 난류모델간의 난류 전단응력 해석능력의 차이는 거의 없다. 후류영역에서는 각 난류모델들이 test section 중앙부분에서 비교적 정확히 해석하나 Two-layer모델과 SST 모델이 V2-f 모델보다 약간 더 정확히 해석하고, Two-layer 모델과 SST 모델간의 차이는 매우 미미함을 관찰할 수 있다.



(b) SST model

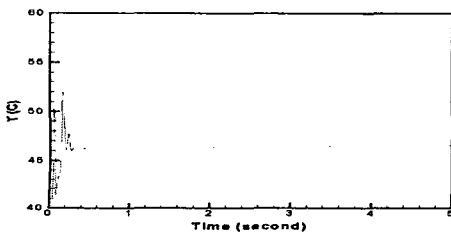


(c) V2-f model

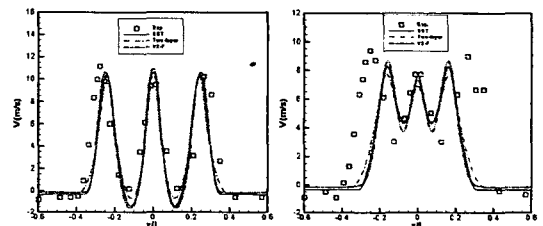


(d) Experiment

Fig.2 한 monitoring 지점에서 시간에 따른 온도 분포도

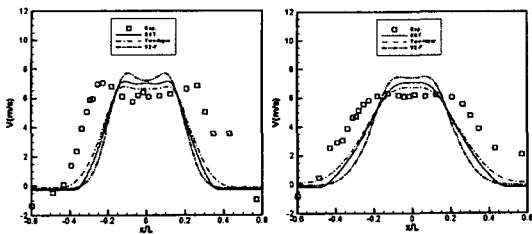


(a) Two-layer model



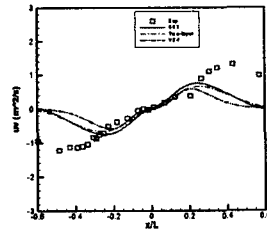
(a) y=48mm

(b) y=98mm



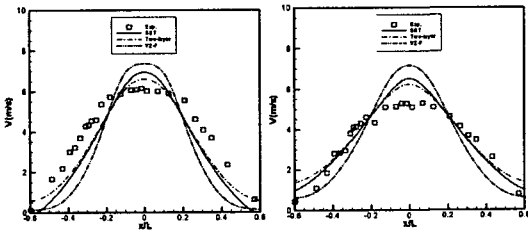
(c) $y=175\text{mm}$

(d) $y=273\text{mm}$



(e) $y=373\text{mm}$

(f) $y=523\text{mm}$



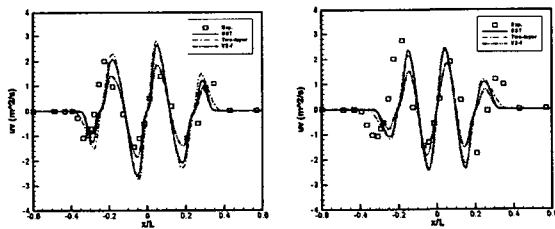
(e) $y=373\text{mm}$

(f) $y=523\text{mm}$

Fig.3 각 수직높이에서 수직방향 속도 분포도

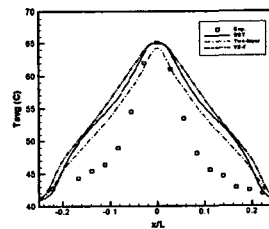
Fig.4 각 수직높이에서 난류 전단응력 분포도

Fig.5와 6은 각 난류모델을 사용하여 계산된 평균 온도와 온도요동 진폭의 크기의 값을 실험의 결과와 비교한 것을 보여주고 있다. 입구 근처에서의 온도 및 온도요동의 크기의 분포가 실험data와 많이 차이가 있는 것은 실험상의 어려움으로 기인하는 것으로 추정된[4]. 입구근처에서 하류까지 전 영역에서 V2-f 모델이 Two-layer 모델과 SST 모델보다 정확하게 온도 및 온도요동 진폭의 크기를 (특히 하류에서의 온도요동 진폭의 크기) 예측함을 관찰 할 수 있다.



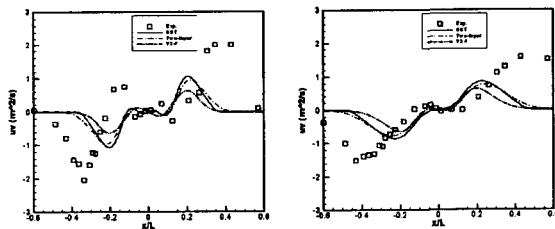
(a) $y=48\text{mm}$

(b) $y=98\text{mm}$



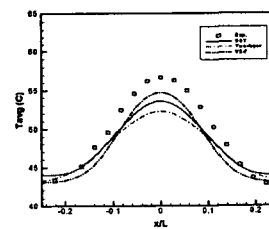
(a) $y=48\text{mm}$

(b) $y=98\text{mm}$



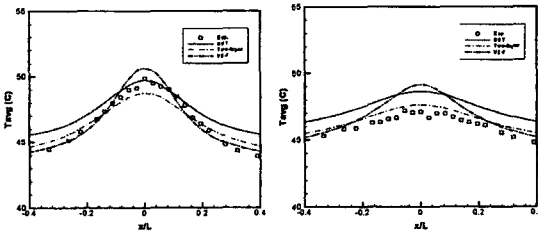
(c) $y=175\text{mm}$

(d) $y=273\text{mm}$



(c) $y=175\text{mm}$

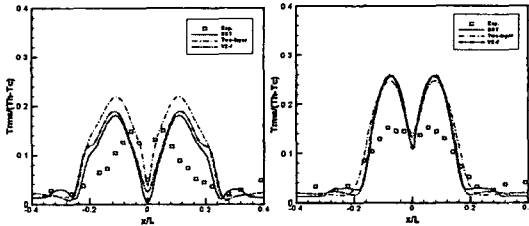
(d) $y=273\text{mm}$



(e) $y=373\text{mm}$

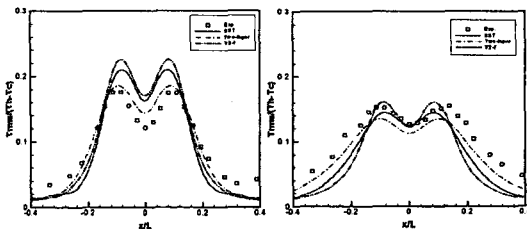
(f) $y=523\text{mm}$

Fig.5 각 수직높이에서 평균온도 분포도



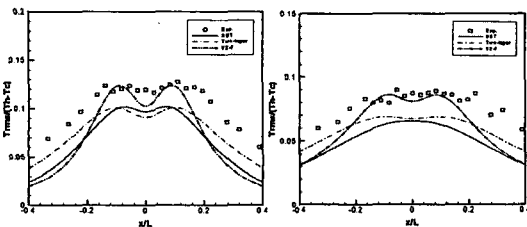
(a) $y=48\text{mm}$

(b) $y=98\text{mm}$



(c) $y=175\text{mm}$

(d) $y=273\text{mm}$



(e) $y=373\text{mm}$

(f) $y=523\text{mm}$

Fig.6 각 수직높이에서 온도요동 진폭의 크기 분포도

4. 결론

기존의 문헌상에 보고된 Two-layer, SST 및 V2-f 난류모델들을 실험결과가 있는 thermal striping 해석에 적용하여 그 정확성을 평가하였다. 시간에 따른 온도요동의 현상은 V2-f 모델만이 해석 가능하였으나, 예측된 온도요동의 진폭 및 주기의 크기는 실험결과와 차이가 있었다. 일반적으로 통계학적인 변수들인 평균속도 및 온도, 난류전단응력 및 온도요동 진폭의 크기 해석에는 난류모델간의, 특히 Two-layer과 SST 모델 간의, 차이는 없었고, V2-f 모델이 온도요동의 진폭의 크기를 보다 더 정확하게 예측하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- [1] Chen, H.C. and Patel, V.C., 1988, "Near-wall turbulence models for complex flows including separation," *AIAA J.*, Vol.26, pp.641-648.
- [2] Menter, F.R., 1994, "Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA J.*, Vol.32, pp.1598-1604.
- [3] Durbin, P.A., 1995, "Separated flow computations with the $k-\epsilon-v^2$ model," *AIAA J.*, Vol.33, pp.659-664.
- [4] 남호윤과 김종만, 2003, "Thermal Striping 온도장 특성 실험자료," 한국원자력연구소 액체금속로 설계기술 개발 과제 내부보고서.
- [5] 최석기, 2004, "Thermal Striping 해석 난류모델 평가," 한국원자력연구소 액체금속로 설계기술 개발 과제 내부보고서, to be issued.
- [6] Zhu, J., 1991, "A low-diffusive and oscillation free convection scheme," *Comm. Appl. Numer. Methods*, Vol.7, pp.225-232.