

## SMART 3차원 유동장 해석을 위한 RANS 모형 평가

### Assessment of RANS Model for 3-D Flow Analysis of SMART

전건호, 황영동, 윤한영, 김희철  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

본 연구에서는 SMART 원자로냉각재계통 3차원 열·유동 해석 코드 개발을 위한 난류 모형 평가를 수행하였다. 난류모형은 혼합거리모형,  $k-l$  모형,  $k-\epsilon$  모형,  $k-\epsilon-f_\mu$  와  $k-\epsilon-v^2$  모형 그리고 레이놀즈응력모형으로 RRSM 모형과 ERRSM 모형 등 7개 모형을 대상으로 경제성, 정확성, 이론성 그리고 적용성 등을 고려하여 평가하였다. 이들 모형은 평판 채널 유동장, 채널 회전 유동장 그리고 U-곡덕트 유동장에서 DNS와 실험 결과에 비교하여 고레이놀즈수 모형으로는 표준  $k-\epsilon$  모형, 저레이놀즈수 모형으로  $k-\epsilon-v^2$ 와 ERRSM을 선정하였다.  $k-\epsilon$  모형은 적은 격자수에 비하여 높은 정확성을 보여 3차원 유동장의 적용에 가장 현실성 있는 모형으로 평가되었다.  $k-\epsilon-v^2$  와 ERRSM 모형은 타원완화방정식을 기본 개념으로 복잡한 형상에 적용상 좋은 모형으로 평가되었다.

#### Abstract

A study was conducted to assess the turbulence model for the code development that will be used for 3D thermal hydraulic analysis of integral reactor SMART. Seven models(MLM,  $k-l$ ,  $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon-f_\mu$ ,  $k-\epsilon-v^2$ , RRSM, and ERRSM) were investigated on flat plate channel flows, rotating channel flow and 3D U-curved duct based on DNS and experiment results and evaluated based on the economy, accuracy, theorization and applicability. The standard  $k-\epsilon$  model of high Reynolds model, the  $k-\epsilon-v^2$  model and the ERRSM of low Reynolds model were selected from the assessment results. The standard  $k-\epsilon$  model was selected as a realistic model for three dimensional flow field because of its higher accuracy in comparison with the other models for small grid numbers. The elliptic-relaxation-equation based models,  $k-\epsilon-v^2$  and ERRSM, have an advantage for the application to the complex geometries.

#### 1. 서론

SMART 일차냉각재계통의 유동은 주냉각재펌프에 의한 강제대류와 노심과 증기발생기에 의한 자연 대류가 결합한 비균질성, 비등방성 난류유동이다. 그 유로 형상은 다중벽면, 심한 곡률과 가변단면 그리고

블록을 가지며 차폐체가 있는 영역과 노심의 다공물질이 있는 영역에서는 국부적으로 냉각재의 정체 현상이 발생하는 복잡한 형상 유로이다. 이런 유동장에서 3차원 난류유동을 해석하기 위해서는 난류모형이 요구되어진다. 난류유동을 해석하기 위한 수치 해석적 모형은 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes), LES(Large Eddy Simulation) 그리고 DNS(Direct Numerical Simulation) 등이다. SMART 3차원 열·유동 해석을 위한 난류 모형으로 LES와 DNS는 RANS에 비하여 좋은 결과를 예측하지만 아직까지는 경제적 문제로 접근이 어려우며 본 연구에서는 낮은 격자 해상도에서도 상대적으로 좋은 결과를 예측하는 시간평균 의한 RANS 난류 모형으로 한정하였다.

RANS는 속도를 평균속도와 요동속도로 나누어 Navier-Stokes 방정식에 적용하여 시간평균을 취하면 레이놀즈응력(Reynolds stress)이 발생한다. 이것은 텐서적으로 9개의 레이놀즈응력성분을 가지고 있으며 3개의 대각성분을 제외한 6개의 비대각성분은  $\overline{u_i u_j} = \overline{u_j u_i}$  가 성립되어 최종적으로 6개의 레이놀즈응력이 미지수로 남게 된다. 난류 모형은 레이놀즈응력을 처리하는 방법에 따라 와점성계수 모형과 2차-모멘트 모형으로 나누어진다. 와점성계수는 차원해석을 통하여 특성길이와 특성속도로 얻어진다. 특성속도를 대변하는 난류운동에너지( $k$ )와 특성길이를 대변하는 난류운동에너지소멸률을 미분방정식으로 푸는 것을 2-방정식 모형인  $k-\epsilon$  모형이라 한다. 그리고 특성속도와 특성길이를 모두 대수식으로 구하는 것을 혼합거리모형이라 한다.

2차-모멘트 모형(Second Moment Closure Model, SMC)은 대수적으로 접근하는 대수응력모형(Algebraic Reynolds Stress Model, ASM)과 미분방정식을 푸는 레이놀즈응력모형(Reynolds Stress Model, RSM)으로 나누어진다. 레이놀즈응력모형은 압력변형률의 처리 방법에 따라 Launder와 그 공동연구자들에 의하여 개발되어진 레이놀즈응력모형(Realizable RSM, RRSM)과 Durbin이 제안한 타원완화모형(Elliptic Relaxation RSM, ERRSM)으로 나누어 생각할 수 있다. 본 연구는 SMART-P의 3차원 유동장 해석에 적용할 난류 모형을 선정하기에 앞서 난류 모형의 종류와 특징 및 장단점들을 조사하고 간단한 형상에 적용하여 현실성 있는 난류 모형을 선정을 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 평가 대상 RANS 모형과 지배방정식

평가 대상 RANS 모형은 간단한 혼합거리모형(Mixing Length Model, MLM)부터 레이놀즈응력모형(Reynolds Stress Model, RSM)까지 7가지 모형에 대하여 조사하였다. 이들 모형 외에도 수정된 MLM, 비선형  $k-\epsilon$  모형, *RNG*  $k-\epsilon$  모형, ASM, 다른 변형된 RSM 등이 있으나, 여기서는 일반적으로 산업 적용용에서 많이 적용되고 이론적으로 검증된 모형으로 각 모형들의 표준이 되는 모형들을 대상으로 하였다.

- 1) 혼합거리모형(Mixing Length Model, MLM) : Van Driest(1956) and Escudier(1966)
- 2)  $k-l$  모형 ( $l$ 는 대수식) : Wolfstein(1967)
- 3) 표준  $k-\epsilon$  모형 : Launder & Spalding(1974)
- 4)  $k-\epsilon-f_\mu$  모형 ( $f_\mu$ 는 대수식) : Launder & Sharma(1974)
- 5)  $k-\epsilon-v^2$  모형 ( $v^2$ 는 미분방정식) : Durbin(1991)
- 6) 레이놀즈응력모형(Realizable RSM, 압력변형률은 대수식) : Speziale et al.(1991)
- 7) 타원완화모형(Elliptic Relaxation RSM, 압력변형률은 미분방정식) : Durbin(1993)

각 모형들에 대하여 표 1에 모형특성과 모형상수를 정리하였으며 자세한 것은 참고문헌으로 돌렸다. 여기서는 단지 계산에 있어 문제가 될 수 있는 부분들을 언급하고자 한다. 우선 혼합거리모형은 대수영역까지는 Van Driest 혼합거리를 그 이후 영역은 Escudier(1966)의  $l_{mix} = 0.09\delta$ 을 적용하였다. 표준  $k-\epsilon$  모형은 벽함수를 사용하는 것으로 다른 모형과는 달리 벽면 제1격자점을  $y^+ = 50$ , 격자수는 벽에 수직인 방향으로 40개를 사용하였다. 반면 다른 모형들은 제1격자점을  $y^+ = 0.5$ , 격자수는 해에 영향을 미치지 않는 범위에서 충분히 생성하였다. SMART 유동장에 적합한 난류 모형의 선정 기준은 복잡한 형상과 높은 레이놀즈수 유동 그리고 자연대류 문제를 고려하여 설정한 평가 기준은 모형의 적용성, 일반성, 이론성 그리고 정확성 등으로 하였다. 모형의 검증은 비균질성이 한 방향만 존재하고 DNS 결과에 의하여 다양한 정보를 제공해주는 평판 채널 유동장을 채택하였다. 유동조건은 완전달발된 비압축성 유동으로 레이놀즈수는 SMART 일차 냉각재 계통과 같은 정도인  $Re=45,500$ 으로 하였다.

레이놀즈응력 모형과  $k-\epsilon$  모형은 실질적으로 평판채널 유동장에서는 큰 차이가 없지만 곡률, 회전, 부력등이 존재하는 유동 등에서 그 특징을 잘 나타낸다. 이들을 평가하기 위하여 사용한 유동장은 평판 채널의 회전 유동과 U-곡덕트이다. 평판채널의 회전에 의한 회전효과와 U-곡덕트에서 곡률효과는  $k-\epsilon$  모형과 RSM 모형의 차이를 분명히 보여 주는 좋은 예이며 RSM 모형들에 대한 모형의 차이를 보다 현실성 있게 평가할 수 있는 형상으로 난류 모형 검증의 장으로 많이 사용되어 지고 있다. 모형 평가를 위해 사용되어진 비압축성 시간평균 Navier-Stock 방정식,  $k-\epsilon$  방정식 그리고 레이놀즈응력방정식과 압력변형률 모형은 다음과 같다.

운동량방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (1)$$

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2)$$

$k-\epsilon$  방정식

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = P_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_j \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} f_1 \frac{P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] \quad (4)$$

레이놀즈응력방정식

$$\frac{D \overline{u_i u_j}}{Dt} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij}^p + D_{ij}^t + D_{ij}^p - \epsilon_{ij} \quad (5)$$

$$\Phi_{ij1} = \alpha_0 \epsilon b_{ij} + \alpha_1 \epsilon \left( b_{ik} b_{kj} - \frac{1}{3} b_{kl} b_{kl} \delta_{ij} \right) \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\Phi_{ij2} = & \alpha_2 P_k b_{ij} + \alpha_3 k S_{ij} + \alpha_4 k (b_{ik} S_{jk} + b_{jk} S_{ik} - 2/3 b_{kl} S_{kl} \delta_{ij}) \\
& + \alpha_5 k (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}) \\
& + \alpha_6 k (b_{ik} b_{lk} S_{jl} + b_{jk} b_{lk} S_{il} - 2 b_{ik} b_{lk} S_{kl} - 3 b_{kl} b_{ij} S_{kl}) \\
& + \alpha_7 k (b_{ik} b_{kl} W_{jl} + b_{jk} b_{kl} W_{il}) \\
& + \alpha_8 k [b_{mn}^2 (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}) + 3 b_{mi} b_{nj} (b_{mk} W_{nk} + b_{nk} W_{mk})] \\
b_{ij} = & \frac{\overline{u_i u_j}}{2k} - \frac{1}{3} \delta_{ij}, \quad P_k = \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \\
S_{ij} = & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad W_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\
B = & 1 - 4.5 B_2 + 9 B_3, \quad B_2 = b_{ij} b_{ji}, \quad B_3 = b_{ij} b_{jk} b_{ki}
\end{aligned} \tag{8}$$

표 1 평가되어진 RANS 난류 모형 정리

모형	$\nu_T$	벽면감쇄함수	모형상수
<i>MLM</i>	$l_{mix} \left  \frac{dU}{dy} \right $	$l_{mix} = f(y^+, \delta)$	$l_{mix} = \kappa y [1 - \exp(-y^+ / 26)]$ $l_{mix} = \text{MAX}(l_{mix}, 0.09\delta), \quad y^+ = \frac{y\delta}{\nu}$
$k-l$	$C_\mu \sqrt{k} l_\mu$	$l_\mu = C_{1y} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{R_y}{A_\mu}\right) \right]$	$C_1 = \kappa C_\mu^{-3/4}, \quad R_y = \sqrt{k} y / \nu$ $A_\mu = 70.0, \quad \kappa = 0.41$
표준 $k-\epsilon$	$C_\mu k^2 / \epsilon$	$U^+ = (1/\kappa) \ln(Ey^+)$	$E = 9.8, \quad \kappa = 0.41, \quad C_\mu = 0.09$
$k-\epsilon-f_\mu$	$C_\mu f_\mu k^2 / \epsilon$	$f_\mu = f(R_T, y^+)$	$f_\mu = \exp\left[-3.4 / \left(1 + \frac{R_T}{50}\right)\right], \quad R_T = \frac{k^2}{\nu \epsilon}$ $f_1 = 1.0, \quad f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_T^2), \quad C_\mu = 0.09$
$k-\epsilon-v^2$	$C_\mu \overline{v^2} k / \epsilon$	$f_{22} - L^2 \nabla^2 f_{22} = \frac{F_{22}}{k}$	$L = C_L \max\left(\frac{k^{3/2}}{\epsilon}, 80 \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}\right), \quad C_L = 0.2$ $T = \max\left(\frac{k}{\epsilon}, C_T \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}\right), \quad C_T = 6.0, \quad C_\mu = 0.22$
<i>RSM</i>	<i>RRSM</i>	$\alpha_i = f(A, Re_i)$	$\alpha_1 = -3.4, \alpha_2 = 4.2, \alpha_3 = -1.8$ $\alpha_4 = 0.8 - 1.3 B_2^{1/2}, \alpha_5 = 1.2, \alpha_6 = 0.4$
	<i>ERRSM</i>	$f_{ij} - L^2 \nabla^2 f_{ij} = \frac{F_{ij}}{k}$	$L = C_L \max\left(\frac{k^{3/2}}{\epsilon}, 80 \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}\right), \quad C_L = 0.2$ $T = \max\left(\frac{k}{\epsilon}, C_T \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}\right), \quad C_T = 6.0$

### 3. RANS 모형 평가

#### 3.1 RANS 모형 : 채널 유동장

그림 1은 혼합거리모형과  $k-l$  모형 그리고 표준  $k-\epsilon$  모형에 대한 주유동속도를 비교한 것이다. 다른 두 모형에 비하여 표준  $k-\epsilon$  모형이 벽면을 제외한 모든 영역에서 좋은 결과를 보이고 있다. 이것은  $\epsilon$ 을 사용한 특성길이의 이론적 타당성 때문으로 고려된다. 벽법칙을 사용한  $k-\epsilon$  모형이 그 이전의 낮은 수준의 모형보다 우수한 것은 와점성계수를 길이척도와 속도척도가 엄밀히 유도된 방정식을 바탕으로 하기 때문이다. 혼합거리모형은 특성속도와 특성길이를 경계층 내측영역에서  $l_{mix} = \kappa y f(y^+)$  그리고 외측영역에서는 경계층두께( $\delta$ )를 사용한  $l_{mix} = 0.09\delta$ 로 하는 2층 모형(two layer model)을 사용하였다. 이 모형은 결국 대수영역에서  $l_{mix} = \kappa y$ 의 변화에 대한 가까운 벽면과 후류영역의 부정확성에 대하여 감쇄함수를 사용한 것이다. 감쇄함수는 이론적 근가가 약하고 후류영역에서 특성길이가 일정하다는 것은 물리적으로 정당성이 없다. 그리고  $k-l$  모형에서 특성속도는

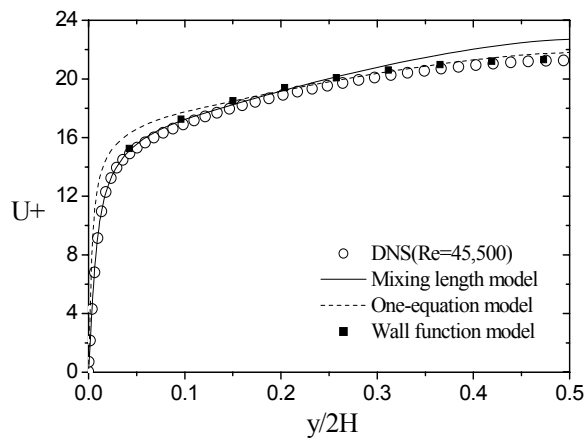


그림 1 MLM,  $k-l$  모형 그리고 표준  $k-\epsilon$  모형의 주유동속도 비교

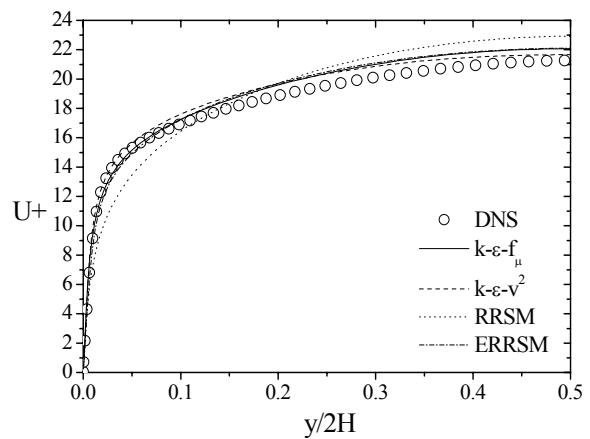


그림2 저레이놀즈수  $k-\epsilon$  모형과 RSM의 주유동속도 비교

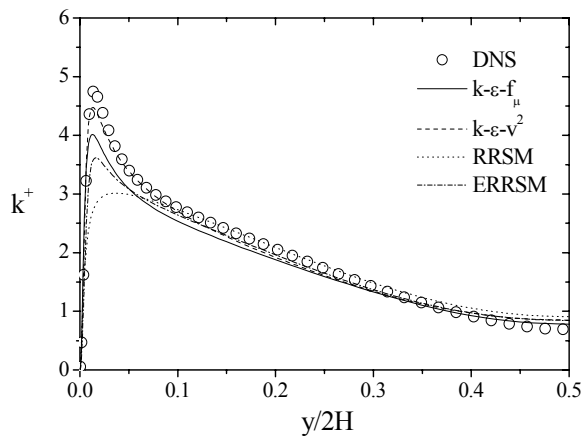


그림 3  $k-\epsilon$ 모형과 RSM의 난류운동에너지 비교

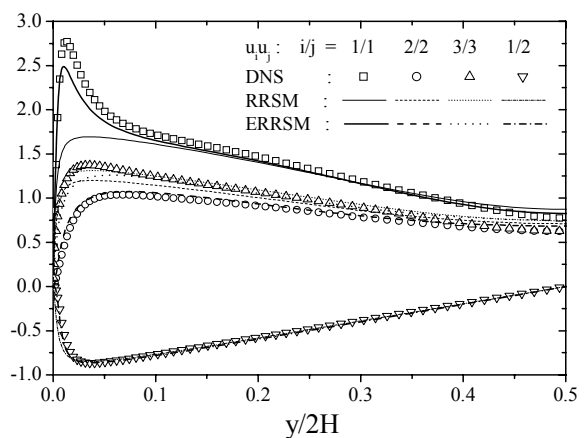


그림 4 RRSM과 ERRSM의 레이놀즈응력 비교

난류운동에너지로 접근하였으나 특성길이는 혼합거리를 사용하는 방법으로 좋은 예측 결과를 기대하기 어려울 뿐만 아니라 형상함수를 포함하는 혼합거리로 인하여 복잡한 유동장에서 적용이 어렵다.

그림 2와 3은 주유동속도와 난류운동에너지를 DNS의 결과와 비교한 것이다. RRSM 모형을 제외한 3 모형은 비슷한 결과를 예측하고 있으며 채널의 중앙( $y/2H=0.5$ )에서  $k-\epsilon-v^2$  모형이 다른 두 모형보다 좋은 결과를 예측하였다. 그리고 난류운동에너지 역시 벽면부근에서  $k-\epsilon-v^2$  모형이 잘 예측하고 있다. 여기서 이론적 바탕이 같은 ERRSM와  $k-\epsilon-v^2$  모형이 같은 수준의 모형보다 좋은 예측을 하는 것은 주목할 만하다. 또한 ERRSM 모형이 RRSM보다 비균질성이 강한 비등방성 모형이란 것을 DNS 결과의 비교를 통하여 알 수 있다. 물론 RRSM의 압력변형률 모형은 고레이놀즈수 조건으로부터 유도되어진 선형 준균질 모형이란 점도 있지만, 다른 이와 같은 종류의 비선형 준균질 모형의 경우도 벽면에서 감쇄함수의 도입 없이는 레이놀즈응력의 정확도가 크게 향상되지는 않는다.

이런 예측 결과들로 SMART에 적용하였을 경우 난류 모형이 유동장에 미치는 영향을 언급하는 것은 어렵다. 그러나 모형이 가지는 이론적 배경과 적용성 그리고 앞으로 모형이 발전할 수 있는 일반성 등을 통하여 모형의 예측 능력을 분석할 수 있다. 우선  $k-\epsilon-f_\mu$  모형과  $k-\epsilon-v^2$ 의 가장 큰 차이는 와점성 계수이다. 즉,  $f_\mu$ 는  $C_\mu k^2/\epsilon$ 가 가지는 벽면부근의 증폭을 억제하기 위하여 무차원 거리 함수( $y^+$ ) 또는 난류레이놀즈수( $R_t$ )를 포함하는 감쇄함수이다.  $k-\epsilon-v^2$  모형의  $v^2$ 는 레이놀즈응력방정식의 벽면수직성분으로  $k-\epsilon-f_\mu$  모형에서  $f_\mu$ 를 사용하는 것과 같은 물리적 개념이다. 즉,  $\nu_T$ 가 벽면에서  $y^6$ 으로 거동하지만  $k-\epsilon-f_\mu$  모형의 경우  $k(\sim y^2)$ 와  $\epsilon(\sim O)$ 이기 때문에  $f_\mu$ 가  $y^2$ 으로 모형되는 것이다. 반면  $k-\epsilon-v^2$  모형은  $\overline{v^2}$ 가 벽면근방에서  $y^4$ 로 거동하므로 감쇄함수의 사용을 피할 수 있다. 따라서 모형의 선정 기준으로부터  $k-\epsilon-v^2$ 모형이 SMART 유동장에서 좋은 예측을 보장 할 것으로 판단되는 이유이다.

그림 4는 RRSM과 ERRSM의 레이놀즈응력을 비교한 것이다. RSM 모형은 비등방성 모형이기 때문에 비등방성에 대하여 비교 설명하는 것이 타당하다. 비등방성이란 레이놀즈응력의 대각성분들의 상대적인 크기 정도를 나타내는 것으로 ERRSM이 RRSM 보다 DNS 결과와 비교하여 비등방성 효과를 잘 예측하고 있다. 비균질성은 벽면 영향에 의해 발생하는 것으로 RRSM은 균질가정에서 유도되기 때문에 벽면부근의 비균질성을 고려하기 위하여 벽면함수나 감쇄함수를 사용하게 된다. 반면 ERRSM은 압력변형률에 상관함수를 사용하여 비국부적으로 유도된 타원방정식의 경계조건에 의해 나타낼 수 있기 때문에 보다 이론적이다. 이런 이유로 ERRSM은 RRSM 보다 주유동속도(그림 2) 및 레이놀즈응력(그림 4)을 잘 예측하게 된다.

### 3.2 표준 $k-\epsilon$ 모형 평가 : 평판 채널 유동장

벽법칙을 사용한 표준  $k-\epsilon$  모형은 개발된 이후 많은 산업적 응용에서 가장 많이 적용되고 검증된 모형이다. 난류 모형이 어떤 특정 유동장에 좋은 예측을 보인다고 하여 다른 유동장에서 좋은 결과를 보이는 것은 아니다. 그러나 표준  $k-\epsilon$  모형은 적은 격자수로 높은 레이놀즈수 유동 해석에서 비교적 좋은 예측 능력을 가지고 있으며 그 적용 범위도 상당히 넓게 응용되고 있다. SMART 유동장에서 이 모형이 어느 정도 예측 능력을 보일지는 알 수 없으나 SMART의 형상과 유동 조건이 결정된 상태에서 제한된 시간 내에 결과를 예측하여야 한다면 전산해석 알고리즘, 난류 모형 그리고 격자 생성의 문제로 국한 할 수 있다. 만약 해석 방법과 난류 모형이 결정된 상태라면 격자 생성이 중요한 요소가 될 것이다.

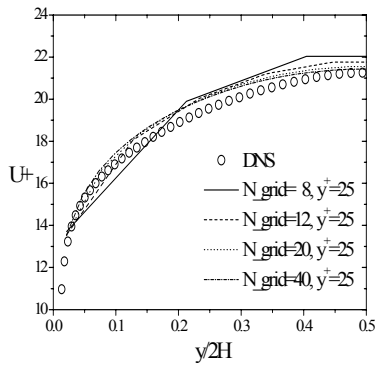


그림 5(a)  $y_1^+ = 25$  인 경우  
주유동속도

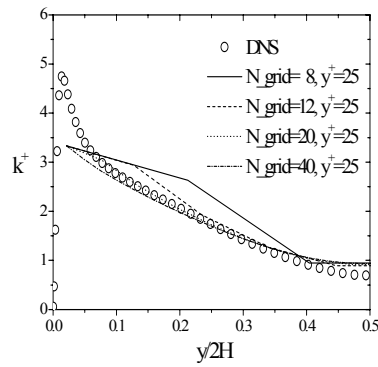


그림 5(b)  $y_1^+ = 25$  인 경우  
난류운동에너지

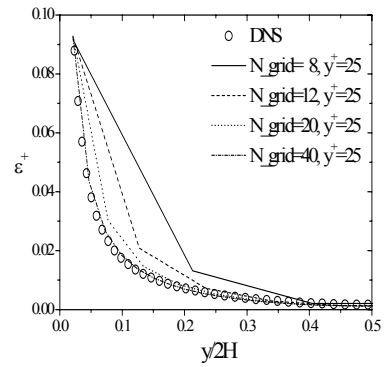


그림 5(c)  $y_1^+ = 25$  인 경우  
난류운동에너지 소멸률

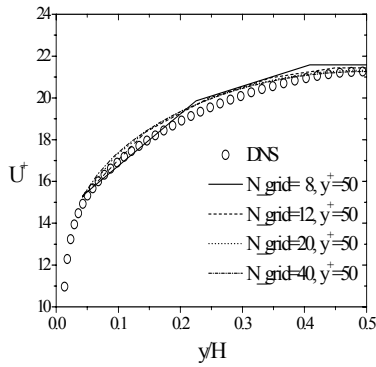


그림 6(a)  $y_1^+ = 50$  인 경우  
주유동속도

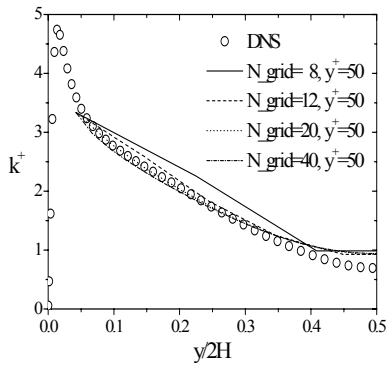


그림 6(b)  $y_1^+ = 50$  인 경우  
난류운동에너지

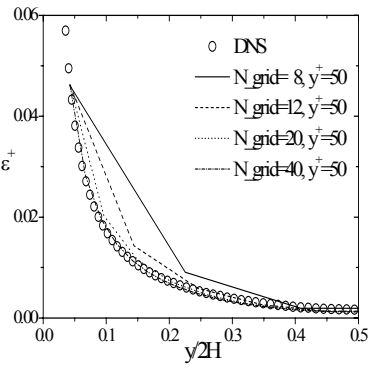


그림 6(c)  $y_1^+ = 50$  인 경우  
난류운동에너지 소멸률

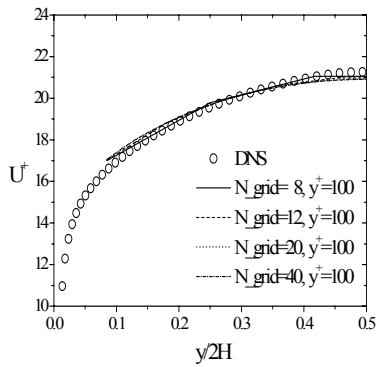


그림 7(a)  $y_1^+ = 100$  인 경우  
주유동속도

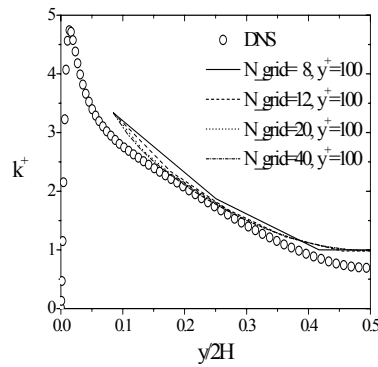


그림 7(b)  $y_1^+ = 100$  인 경우  
난류운동에너지

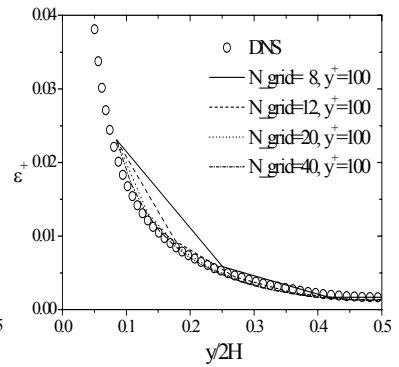


그림 7(c)  $y_1^+ = 100$  인 경우  
난류운동에너지 소멸률

따라서 고레이놀즈수 모형은 격자수( $N$ )와 벽으로부터 제1격자점  $y_1^+$ 의 위치가 유동장에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 격자수는 등간격으로 8, 12, 20, 40에 대하여 조사되었으며, 제1격자점은 벽면으로부터 무차원 거리( $y_1^+$ )가 25, 50, 100 으로 하여 12 경우에 대하여 평판 채널 유동을 계산하여 무차원 주유동속도( $U^+$ ), 난류운동에너지( $k^+$ )와 소멸률( $\epsilon^+$ )에 대하여 DNS와 비교하였다. 그림 5는  $y_1^+ = 25$  인 경우 격자수의 변화에 대한 비교이다. 주유동속도의 경우 대수영역에서 모두 높게 예측하고 있으며 채널의 중앙  $y/2H = 0.5$ 에서 격자수가 적을수록 높게 예측하는 것은 연속방정식으로부터 나타나는 것으로 격자 해상도에 대한 오차이다.  $k^+$ 는 제1격자점의 중요성을 보여준다. 즉, 벽법칙을 사용하면 대수영역에서 무차원 속도와 무차원 거리 사이에 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$U^+ = (1/\kappa)\ln(y^+) + B$$

이때  $\kappa(=0.41)$ 는 Von Karman의 상수이고  $B(=5.5)$ 는 벽면 조도 매개변수이다.  $y_1^+ = 25$ 가 점성저층영역과 대수영역의 중간 지점이기 때문에 제1격자점에서  $k^+$ 가 낮게 예측되고 있다. 그리고 격자수가 많을수록 대수영역에서 DNS와 잘 일치함을 알 수 있다.  $\epsilon^+$ 은 격자가 40인 경우 DNS와 일치하나 20 이하인 경우 소멸률의 급격한 변화에 낮은 해상도로 인하여 예측 능력이 떨어진다. 벽에서 첫 번째 격자점으로  $y_1^+ = 25$ 를 사용하는 경우 제1격자점에서 잘못 예측하는 이유는 난류에너지 생성과 소멸의 균형을 통하여 설명할 수 있다. 표준  $k-\epsilon$  모형은 대수영역에서 벽법칙을 사용하고,  $k$ 의 경계조건을 구하기 위하여 난류에너지의 생성과 소멸이 균형을 이룬다는 조건  $P = \epsilon$ 을 사용한다. 그러나 이 조건은  $y^+ > 30$ 에 적용하는 것이 보다 타당하며  $y_1^+ = 25$ 에서는 난류 생성이 소멸보다 크기 때문에 제1격자점에서  $k^+$ 를 잘못 예측하게 된다.

그림 6은  $y_1^+ = 50$ 에 대한 경우이다.  $y_1^+ = 25$ 와 비교하여 전체적으로 좋은 예측을 보이며 첫 번째 격자에서 보다 정확한 예측을 한다는 것을 알 수 있다. 동일한 격자수에 비하여  $y_1^+ = 25$  보다 좋은 결과를 예측하는 것은 상대적으로 격자 해상도가 높기 때문이다. 그림 7은  $y_1^+ = 100$  경우로 제1격자점에서  $U^+$ ,  $k^+$  그리고  $\epsilon^+$ 가 DNS 보다 높게 예측하였다. 이는 제1격자점과 벽면 사이의 속도가 선형적으로 계산되어지기 때문이다. 비압축성 유동은 연속방정식을 만족시켜야 하는데 벽에서 제1격자점까지 속도 변화는 비선형이다 그러나 실제 계산에서는 선형으로 간주하기 때문에 그 차이만큼 모든 격자점들이 영향을 받게 된다. 그러나 레이놀즈수가 50,000 보다 더 높으면 상대적으로 그 영향은 줄어들지만 그 보다 낮은 레이놀즈수 유동에서는 제1격자점의 위치가 클수록 잘 못된 예측을 하게 된다. 이런 이유로 표준  $k-\epsilon$  모형은 높은 레이놀즈수 유동에서 보다 정확한 예측을 보이게 된다. 그리고 높은 레이놀즈수 유동은 와(eddy)가 상대적으로 작아져서 등방성 개념이 강하기 때문에 등방성 모형인 표준  $k-\epsilon$  모형이 좋은 예측을 보이게 된다.

### 3.3 RRSM과 ERRSM 평가 ; 채널 회전 유동과 U-곡덕트 유동

평판 채널 유동장에서 주유동속도와 난류운동에너지의 비교를 통하여 난류모형이 가지는 특징을 살펴 보았다. 그러나 고차 모형인 RSM과 ERRSM의 경우 다른 모형과의 정확성 평가를 위해 보다 복잡한 유동장에서 검증이 필요하다. 따라서 레이놀즈수모형을 채널 회전 유동장과 U-곡덕트 유동장을 택하여



검증을 하였다. 회전 유동장에서는 단지 ERRSM 모형만 검증하였다. RRSM 모형은 정지상태에서 DNS와 좋은 예측을 보이지 못하였을 뿐만 아니라 회전 유동장에서는 회전효과에 의한 흡입면( $y/2H=0.0$ )에서 강한 층류화 현상을 예측하지 못하며 또 다른 이유는 대부분의 RSM 모형들이 높은 회전수에서 수렴하지 못하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 비슷한 결론을 얻었다. 그림 8은 회전수  $Ro = 0.2$ 에서 ERRSM과 Pettersson & Andersson(1997)의 DNS 결과와 비교한 것이다. ERRSM은 흡입면에서 층류화 현상을 잘 예측하고 있으며 레이놀즈응력 생성항에 직접적인 영향을 미치는 전단응력  $uw^+$ 의 정확한 예측으로 다른 대각성분 응력들이 DNS와 잘 일치하고 있다. 여기서  $k-\epsilon$  모형에 대하여 언급하지 않은 것은 평판채널 유동장에서 등방성 표준  $k-\epsilon$  모형은 방정식 내 회전항이 영이기 때문에 회전효과가 나타나지 않는다. 그러나 비선형  $k-\epsilon$  모형이나 ASM의 경우 회전에 간접적으로 영향을 미치는 항이 생성되기 때문에 회전효과가 전혀 나타나지 않는 것은 아니지만 그 효과는 아주 적은 것으로 알려져 있다.

그림 9는 U-곡덕트 유동장을 나타낸 것이다. 곡덕트의 입구조건은 직관에서 완전발달된 유동조건을 주었다. 일반적으로 U-곡덕트 유동장의 정확성 평가는 2중극대 현상이다. 즉,  $\theta = 45$  이후에 나타나는 곡관의 중앙에서 이차유동의 생성으로 인하여 주유동속도가 양분화되는 현상을 말하는데 이런 현상의 원인은 레이놀즈응력의 비등방성과 이차유동 때문인 것으로 알려져 있다. 그림 10은 곡덕트 입구로부터  $\theta = 90$ 인 영역에서 주유동속도와 이차유동을 RRSM과 ERRSM을 비교한 것이다. LDV로 측정된 Chang(1983) 결과와 hot-wire로 측정된 Lee(2000)의 결과와 비교하여 ERRSM 모형이 RRSM보다  $2x/H = 0.5, 0.75$ 에서 이중극대를 잘 예측함을 알 수 있다. 이것은 평판 채널 유동 그림 2-4 조사에서 ERRSM이 RRSM보다 잘 예측한 것과 같은 결과이다.

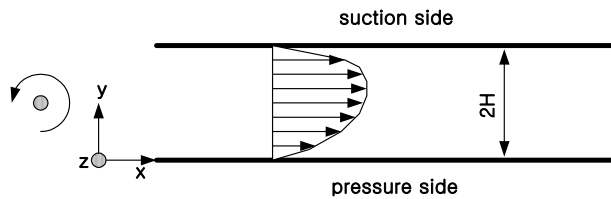


그림 7 평형 평판 회전 유동장

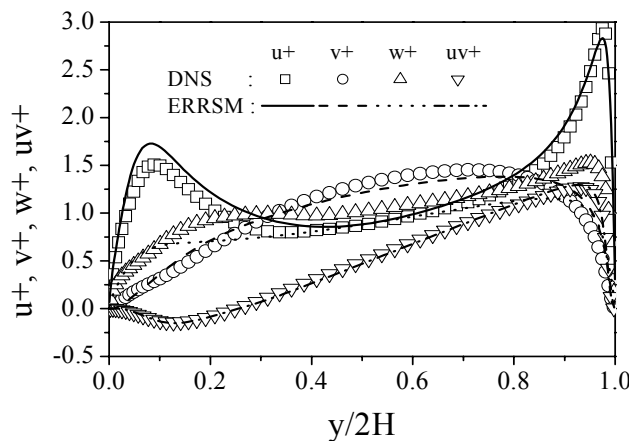


그림 8 회전유동( $Ro = 0.2$ )에 대한 ERRSM 모형의 레이놀즈응력 분포  
(DNS : Pettersson & Andersson, 1997)

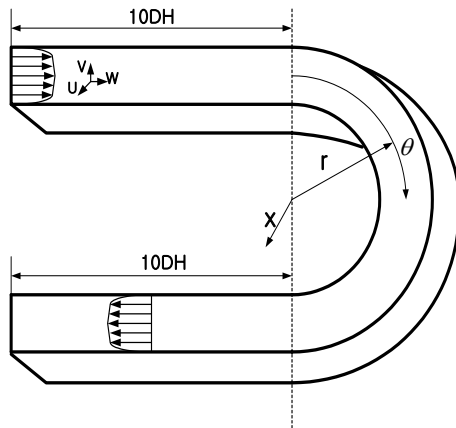


그림 9 U-곡덕트 유동장

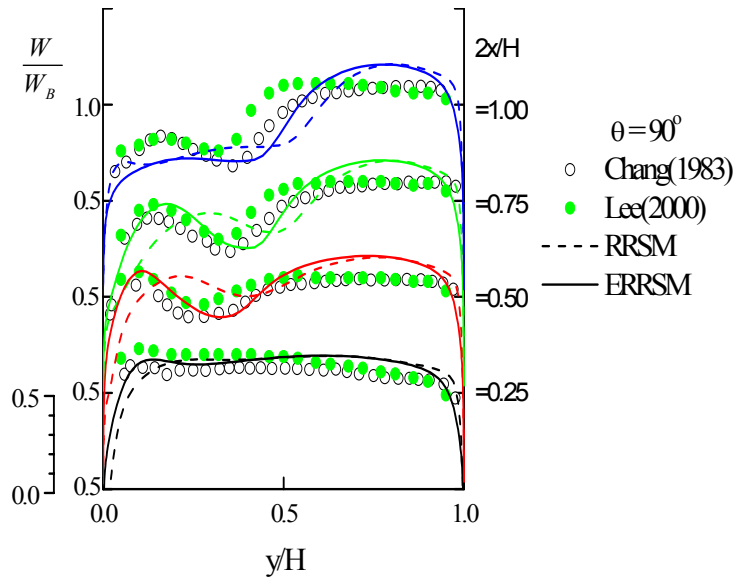


그림 10(a) U-곡덕트  $\theta = 90^\circ$ 에서 RRSM과 ERRSM의 주유동속도 분포 비교

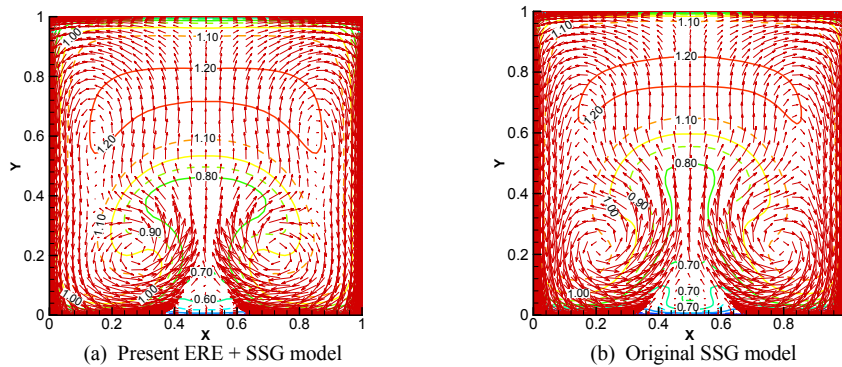


그림10(b) U-곡덕트  $\theta = 90^\circ$ 에서 RRSM과 ERRSM의 2차유동과 주유동속도 분포

### 3.4 모형 평가 및 고찰

표 2는 평판채널 유동, 회전유동, U-곡덕트 유동 해석을 통하여 간접적으로 SMART 3차원 유동장에 적용 가능한 난류 모형을 이론성, 적용성, 경제성 그리고 정확성에 대하여 가장 낮은 1수준에서 가장 높은 5수준으로 나누어 평가한 것이다. “**이론성**”은 모형이 가지는 물리적 의미와 이론적 배경에 대한 평가이다. 혼합거리모형과  $k-l$  모형이 낮은 평가를 받은 이유는 난류 특성길이에 대한 불분명함 때문이다. 반면 표준  $k-\epsilon$  모형이 상대적으로 높은 평가를 받은 이유는 특성길이와 특성속도가 이론적으로 정립된 형태이며, 대수영역에서 벽법칙을 사용함으로 높은 레이놀즈수 유동에 적용이 용이하고 복잡한 3차원 유동장에 적용이 가능하기 때문이다. RSM 모형이 표준  $k-\epsilon$  모형 보다 낮은 이유는 RSM 모형을 축약 ( $i=j$ )한 것이  $k-\epsilon$  모형이며 이때 압력변형률이 소거되기 때문이다. 만약 압력변형률 모형이 이론적으로 접근되면 레이놀즈응력 모형이 보다 좋은 모형으로 평가받을 수 있을 것이다. ERRSM 모형이 RRSM 모형보다 좋은 평가를 받는 이유는 압력변형률의 이론적 접근 때문이며,  $k-\epsilon-v^2$ 를  $k-\epsilon-f_\mu$ 보다 높이 평가한 것은 감쇄함수로부터 자유롭기 때문이다. “**적용성**”은 SMART 3차원 유동장에 대한 벽면함수와 감쇄함수의 사용 유무와 모형의 명확성이다. 벽면함수와 감쇄함수의 사용 유무는 표 2.1에 정리하였으며  $k-\epsilon-v^2$ 와 ERRSM이 높은 수준을 받은 것은 이들 함수를 사용하지 않았다는 것이다. 그리고 표준  $k-\epsilon$  모형은 대수영역을 정의하기 위하여  $y^+$ 와  $U_\tau$ 를 적용하여야 하기 때문이다.  $y^+$ 의 적용은 곡률과 다중벽면이 있는 유동장에서 정의하기가 어렵다. “**경제성**”은 3차원 유동장 해석에서 정확성에 대한 전산해석 시간의 평가이다. 특히 SMART-P 유동장의 경우 높은 레이놀즈수와 다중벽면으로 인한 많은 격자를 요구한다. 이 경우 시간적인 문제에서 가장 탁월한 것은 가까운 벽면근방에 격자를 형성하지 않는 표준  $k-\epsilon$  모형이다. 그리고  $k-\epsilon-v^2$ 가  $k-\epsilon-f_\mu$ 보다 많은 방정식에도 높은 수준인 것은 모형의 이론적 정당성으로부터 발생하는 벽면부근에서 모형의 안정성에서 발생하는 수렴성 때문이다. “**정확성**”은 유동장 해석을 통한 예측 능력이다. 앞서 조사한 평판 채널의 회전 유동과 비회전 유동 그리고 U-곡덕트의 결과로부터 ERRSM이 가장 좋은 결과를 예측하였으며 그다음으로 평판채널 유동장에서 주유동속도와 난류운동에너지를 가장 잘 예측한  $k-\epsilon-v^2$ 모형이 본 연구에서 좋은 결과를 예측하였다.

표 2 일체형원자로 SMART 열·유동장 해석에 적용 가능한 난류 모형 평가

모형	이론성	적용성	경제성	정확성	평균
<i>MLM</i>	1	3	4	2	2.50
$k-l$	2	2	4	2	2.50
표준 $k-\epsilon$	4	4	5	3	4.00
$k-\epsilon-f_\mu$	3	3	3	4	3.25
$k-\epsilon-v^2$	4	5	4	5	4.50
<i>RRSM</i>	3	3	3	3	3.00
<i>ERRSM</i>	4	5	3	5	4.25

표 3 선정된 난류 모형의 장단점 비교

모 형	장 점	단 점
$k-\epsilon-v^2$ 모 형	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 등방성, 저레이놀즈수, 국부적 모형</li> <li>● SMART-P 3차원 유동장 해석에서 저레이놀즈수 모형 중 적용성, 이론성, 경제성, 정확성이 탁월한 모형이다.</li> <li>● 벽면부근까지 해석이 가능하며 RSM에 비하여 적은 비용으로 표준 <math>k-\epsilon</math> 모형보다 향상된 결과를 예측한다.</li> <li>● 박리유동, 천이에 가까운 저레이놀즈수 유동, 곡률, 원심력, 열전달을 동반한 유동장에서 표준 <math>k-\epsilon</math> 모형 보다 좋은 예측을 한다.</li> <li>● RSM 모형보다 응용력이 우수하며, 형상에 종속되지 않는 모형이다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 회전유동장에서 직접적으로 회전 영향이 고려되지 못한다.</li> <li>● 곡률이 있는 경계층 유동, 소용돌이 유동이 있는 유동장에서 예측 능력이 떨어진다.</li> </ul>
표준 $k-\epsilon$ 모 형	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 등방성, 고레이놀즈수, 국부적 모형</li> <li>● 3차원 유동장에서 압력강하, 마찰계수, 유동의 경향 등 유동의 전반적인 특성을 고찰하기 위한 모형으로 설계에 있어 타당성을 검증하기 좋은 모형이다.</li> <li>● 높은 레이놀즈수의 유동을 경제적인 비용으로 보다 쉽게 접근할 수 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 벽면 유동 해석이 불가능하다.</li> <li>● 회전유동장에서 직접적으로 회전 영향이 고려되지 못한다.</li> <li>● 곡률이 있는 경계층 유동, 소용돌이 유동이 있는 유동장에서 예측 능력이 떨어진다.</li> </ul>
$ERRSM$	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 비등방성, 저레이놀즈수, 비국부적 모형</li> <li>● RANS 모형 중 가장 일반화된 모형</li> <li>● 곡률, 부력이 존재하는 유동장에 적합한 모형으로 국부적인 설계에 유용하다. 즉, 주냉각재펌프, 증기발생기, 원자로 하향유로, 노심하부, 노심 및 노심지지원통 등의 각 요소별로 열·유동 특성과 현상을 조사하고 설계의 최종적인 결정을 하는데 유용하다.</li> <li>● 복잡한 형상의 유동장에서 유동 예측이 매우 정확하다.</li> <li>● 레이놀즈응력의 생성, 회전, 부력 효과를 모형 없이 엄밀히 적용할 수 있다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 많은 경제적 비용(<math>k-\epsilon</math> 모형에 비해 한 차수 이상 많은 계산시간이 요구된다)</li> <li>● <math>k-\epsilon</math> 모형에 비해 응용력이 떨어진다.</li> <li>● 유동장에 따라 예측 능력의 신뢰도 오차가 크다.</li> <li>● 압력변형률, 소멸률텐서, 난류확산 모형에 대한 문제가 남아있다.</li> </ul>

#### 4. 결론

일체형원자로 SMART 3차원 열·유동 해석을 위한 난류 모형 선정에 관한 연구를 수행하였다. 난류 모형 선정 기준에서 형상에 종속되지 않는 모형과 이론적으로 접근한 모형, SMART 유동 특성 그리고 모형의 정확성 등을 고려하여 평가하였다. 난류 모형의 선정에서 혼합거리모형,  $k-l$  모형,  $k-\epsilon$  모형 그리고  $RSM$ 에 대하여 조사하였다. 혼합거리모형과  $k-l$  모형은 특성길이에 대한 모형의 불완전성 때문에 좋은 결과를 예측하지 못하였으며, 고레이놀즈수  $k-\epsilon$  모형이 적은 격자에 보다 좋은 결과를 예측하였다.  $k-\epsilon$  모형의 단점인  $y^+$ 와 적분상수  $B$ 의 선정에 대한 문제가 존재하지만 적은 격자수의 사용과 높은 레이놀즈수 유동에 적용 등을 고려할 때 SMART 3차원 유동장 해석에 잘 부합되는 모형이다. 그리고 채널 내의 격자수와 제1격자점 위치에 대한 조사에서 격자수는 20 이상 그리고  $y_1^+$ 는 50 내외로 하는 것이 보다 좋은 결과를 예측하였다.

저레이놀즈수 모형에 대한 조사는  $k-\epsilon-v^2$  모형이  $k-\epsilon-f_\mu$  모형 보다 좋은 결과를 예측할 뿐만 아니라 이론적 개념과 적용성이 우수하였다. 그리고 레이놀즈응력모형에서, 타원완화모형(ERRSM)은 감쇄함수와 국부적인 개념을 사용하는 RRSM 모형보다 좋은 결과를 예측하였다. 따라서 SMART 3차원 유동장 해석에 적용될 난류 모형은  $k-\epsilon-v^2$ , 표준  $k-\epsilon$  그리고 타원완화방정식을 적용한 레이놀즈응력 모형(ERRSM)이 보다 적합한 모형으로 평가되었다.

#### 참고문헌

- 1 KAERI/TR-2142/2002, 일체형원자로 기본설계보고서, 한국원자력연구소, 2002.
- 2 KAERI/TR-2540/2003, SMART-P의 3차원 유동장 해석을 위한 비균질  $k-\epsilon-v^2$  난류모형 개발, 한국원자력연구소, 2003.
- 3 Chang, S. M., Humphrey, J. A. C. and Modavi, A., 1983, "Turbulent flow in a strongly curved U-bend and downstream tangent of square cross sections," PCH Physico Chemical Hydrodynamics, 4, 243.
- 4 Van Driest, E.R , "On Turbulent Flow Near Wall," Journal of the Aeronautical Sciences, Vol.23(1956), p.1007.
- 5 Durbin P.A., "Near wall turbulence closure modeling without damping function", Theoret. Comput. Fluid Dyn. Vol.3(1991), pp.1-13.
- 6 Durbin P.A., "A Reynolds stress model for near-wall turbulence," J. Fluid Mechanics, Vol.249(1993), pp. 465-498.
- 7 Escudier, M. P., "The Distribution of Mixing Length in Turbulent Flows Near Wall." Imperial College, Heat Transfer Section Report SF/R/2(1966).
- 8 Kim, J., Moin, P. and Moser, R., "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number," J. Fluid Mech., Vol.177(1987), pp. 133-166.
- 9 Launder, B.E and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol.3(1974), pp.269-289.
- 10 Launder, B.E. and Sharma, B.I., "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the

Calculation of Flow Near a Spinning Disc,' Letters in Heat and Mas Transfer, Vol.1(1974), No.2, pp. 131-138.

- 11 Moser, R. D., Kim, J. and Mansour, N. N., " Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re_\tau = 590$ ," Phys. Fluids, Vol.11(1999), pp. 943-948.
12. Naot, D., Shavit, A. and Wolfshtein, M., "Two point correlation model and the redistribution of Reynolds stresses", Phys. Fluids, Vol.16(1973), pp. 738-743.
13. Pettersson B.A and Andersson H.I, 1997, Near-wall Reynolds-stress modelling in noninertial frames of reference, Fluid Dynamics Research, Vol. 19, pp. 251-276.
14. Wolfshtein, M, "Convection Processes in Turbulent Impinging Jets" Imperial College, Heat Transfer Section Report SF/R/2(1967).