2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# MARS 1D MULTID Component의 점성응력모델 개발 및 평가

## An Implementation and Assessment of viscous Stress Model in MARS 1D MULTID Component

배성원, 정재준, 정법동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요 약

세계 각국에서 개발 또는 보유하고 있는 원전용 열수력 코드에 대해서 다차원 해석 능력을 부여하는 것은 그동안 많은 관심과 노력의 대상이었다. 그 결과 몇몇 해석코드에서는 다차원 해석 기능을 포함한 모델요소를 추가하여 현재 사용자층을 넓히고 있다. 그러나 이들 코드는 대류항의 도입만으로 다차원 해석기능을 한정하고 있다. 한국 원자력 연구소에서도 현재 개발중인 최적 통합안전해석 코드인 MARS에 다차원 해석기능을 추가하는 노력이 계속되고 있다. 다차원 해석 능력은 형상입력과 운동량 방정식의 대류항과 점성항 유무로 구분된다. MARS의 다차원 형상입력은 MULTID라는 Component로 개발 완료 되었으며 운동량 방정식의 다차원 대류항에 대해서도 적용후 검증단계를 거치고 있다. 특히, MARS는 대류항 뿐 아니라 다차원 점성항을 추가함으로써 사용자들에게 좀 더 실제적인 해석값을 얻을 수 있도록 하였다. 이를 위해, 난류점성을 Prandtl's Mixing Length 가정으로 얻어내어 MARS 1D 모듈에 적용하였다. 적용후 간단한 개념문제를 통해 적용결과를 평가하였다. 원통형 좌표계에서도 적용 가능하므로 원자로를 비롯한 원통형 형상의 다차원 유동해석에 매우 유리하다.

## Abstract

It has been a strong issue for nuclear system and safety simulation codes to imply a multidimensional analysis capability. Currently, a few codes are successfully implying the multidimensional capability but only with lateral convective terms in momentum equation. In KAERI, an effort to give an ability to simulate the multidimensional geometry with the shear stress terms as well as the lateral convective terms has been devoted. As the result, newly developed MARS 1D component " MULTID" makes it possible to model a large bulk fluid volume both with the Cartesian and cylindrical coordinates. For the implementation of shear stresses, Pandtl' s Mixing Length Theory is simply applied to get a turbulent viscosity. Several problems are described and solved with the MARS code. The results show qualitatively reasonable agreements with other CFD code results. .

## 1. 서론

MARS2.1코드[1,2]는 RELAP5/MOD3.2.2 와 COBRA-TF[3] 코드의 통합을 통한 다차원 분석 기능을 보유하고 있다. INEEL은 NRC로부터 독립한 뒤 그간 지속적으로 추진해 온 3차원 열수력 해석능력 검토를 완성하여 RELAP5/MOD3.2.2와 연계한후 RELAP5/3D[4]로 발표하였다. RELAP5/3D는 DOE를 지원하는 코드로 채택되어 INEEL 내부 및 대만을 비롯한 국제사회의 사용자를 확보하고 있다. NRC는 이와 무관하게 국제 CAMP 등을 구성하여 RELAP5/MOD3.3까지 개발하여 한국을 비롯한 여러나라의 사용자를 확보하고 있다. MARS 코드는 개발 초기부터 NRC의 CAMP 활동에 적극 참여하여 NRC의 최신 코드모델이 적용되어 있다. 기존 NRC RELAP5에는 Cross Flow Junction을 이용하여 열수력의 다차원 현상을 어느 정도 모의할 수 있으나 근본적으로 Lateral Momentum Flux, Viscous/Turbulent Shear Stress 를 모델하고 있지 않기 때문에 Full 3D 분석은 불가능한 것으로 알려져 있다. 이에 따라 부수로해석에 적합한 MARS 3D 모듈과 함께 Plant의 3D 열수력 해석을 할 수 있는 MARS 1D 모듈을 개발하고 다차원 대류항과 점성응력항을 추가하였다. 본 논문은 MARS 1D 모듈에 추가된 MULTID Component의 다차원 대류항을 간단한 개념문제로 평가하고 점성응력항의 적용성을 검토하였다. 표 1은 MARS의 다차원 해석체계의 현황과 개발상황을 보여준다.

표 1. 여러가지 다차원 해석코드의 현황 비교

| | MARS 1D | MARS 3D | TRACE[5] & RELAP5/3D |
|---|---|---|---|
| Lateral convection term | Y (new) | Y (original) | Y |
| Viscous stress term | Y (new) | Y (new) | N |
| Modular 3D component | Y (new) | N | Y |

## 2. 다차원 대류 및 점성응력항의 모델 기법

애초의 개발시에 1D 계산을 목적으로 하였으므로 기존의 MARS 1D 코드에서는 모든 속도항은 상(phase)의 구분만 되어 있었다. MARS 1D의 연속방정식과 운동량 방정식은

다음과 같다.

<u>Continuity Equation</u>

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g \rho_g\right)+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_g \rho_g V_g A\right)=\Gamma_g \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_f \rho_f\right)+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_f \rho_f V_f A\right)=\Gamma_f \tag{2}$$

<u>Momentum Equation (nonconservative form)</u>

$$\begin{aligned}&\alpha_f \rho_f A\frac{\partial V_f}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_f \rho_f A\frac{\partial V_f^2}{\partial x}=-\alpha_f A\frac{\partial P}{\partial x}+\alpha_f \rho_f B_x A-\left(\alpha_f \rho_f A\right)FWF(V_f)\\&+\Gamma_f A\left(V_{fI}-V_f\right)-\left(\alpha_f \rho_f A\right)FIF\left(V_f-V_g\right)\\&-C\alpha_g \alpha_f \rho_m A\left[\frac{\partial\left(V_f-V_g\right)}{\partial t}-V_f\frac{\partial V_g}{\partial x}+V_g\frac{\partial V_f}{\partial x}\right]\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}&\alpha_g \rho_g A\frac{\partial V_g}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_g \rho_g A\frac{\partial V_g^2}{\partial x}=-\alpha_g A\frac{\partial P}{\partial x}+\alpha_g \rho_g B_x A-\left(\alpha_g \rho_g A\right)FWG(V_g)\\&+\Gamma_g A\left(V_{gI}-V_g\right)-\left(\alpha_g \rho_g A\right)FIG\left(V_g-V_f\right)\\&-C\alpha_g \alpha_f \rho_m A\left[\frac{\partial\left(V_g-V_f\right)}{\partial t}+V_f\frac{\partial V_g}{\partial x}-V_g\frac{\partial V_f}{\partial x}\right]\end{aligned} \tag{4}$$

(3)식과 (4)식에서, 좌변 두번째 항은 주축방향 속도만을 고려하는 1차원 코드의 특성을 잘 나타내주고 있다. 3차원 Momentum Equation Set (Non Conservative Form) 은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}+\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}\right)=-\nabla p+\vec{\sigma}+\rho\vec{f} \tag{5}$$

식(5)의 좌변두번째 항을 다차원적 특성을 고려하여 나타내면 Cartesian Coordinate 에서는 식(6)과 같이 나타난다. Cylindrical Coordinate로는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}=\begin{cases}V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_x}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_x}{\partial z}\\V_x\frac{\partial V_y}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_y}{\partial z}\\V_x\frac{\partial V_z}{\partial x}+V_y\frac{\partial V_z}{\partial y}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}\end{cases} \tag{6}$$

$$\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}=\begin{pmatrix} V_r\dfrac{\partial V_r}{\partial r}+\dfrac{V_\theta}{r}\dfrac{\partial V_r}{\partial\theta}+V_z\dfrac{\partial V_r}{\partial z} \\ V_r\dfrac{\partial V_\theta}{\partial r}+\dfrac{V_\theta}{r}\dfrac{\partial V_\theta}{\partial\theta}+\dfrac{V_rV_\theta}{r}+V_z\dfrac{\partial V_\theta}{\partial z} \\ V_r\dfrac{\partial V_z}{\partial r}+\dfrac{V_\theta}{r}\dfrac{\partial V_z}{\partial\theta}+V_z\dfrac{\partial V_z}{\partial z}\end{pmatrix} \tag{7}$$

MARS 1D Momentum Equation을 3차원으로 확장하기 위하여는 각 x-y-z Momentum Equation에서 Lateral Momentum Term을 고려하고 Shear Term을 고려하여야 한다. 이때, Viscosity가 Constant라고 가정하면 x-Momentum Time Averaged Equation은 다음과 같이 간단한 형태로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}&\alpha_g\rho_gA\frac{\partial u_g}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_g\rho_gA\frac{\partial u_g{}^2}{\partial x}+\alpha_g\rho_gAv_g\frac{\partial u_g}{\partial y}+\alpha_g\rho_gAw_g\frac{\partial u_g}{\partial z}= \\ &-\alpha_gA\frac{\partial P}{\partial x}+\alpha_g\rho_gB_xA-\alpha_g\rho_gA(FWG)u_g+\Gamma_gA(u_{gI}-u_g) \\ &-\alpha_g\rho_gA(FIG)(u_g-u_f)-C\alpha_g\alpha_f\rho_mA\left[\frac{\partial(u_g-u_f)}{\partial t}+u_f\frac{\partial u_g}{\partial x}-u_g\frac{\partial u_f}{\partial x}\right] \\ &+\alpha_gA(\mu_g+\mu_{g,T})\left[\frac{\partial^2u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2u}{\partial z^2}\right]\end{aligned} \tag{8}$$

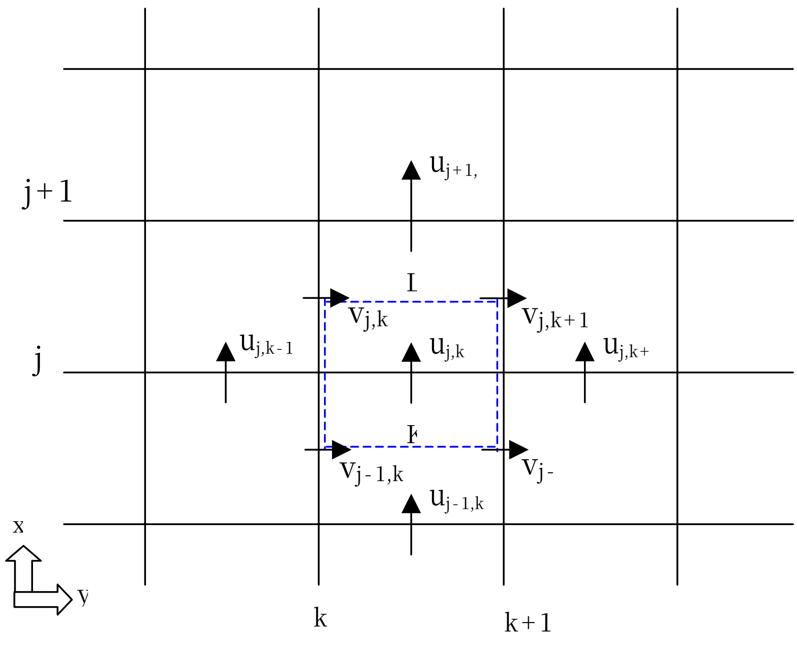



그림 1. x-Direction으로 Staggered된 2차원 운동량 방정식 노딩

이를 유한 차분식으로 나타내기 위해 편의상 그림 1과 같은 2차원 노딩을 고려하였다. 그림 1에서 수직방향이 x-Direction이며 수평방향이 y-Direction으로 가정한다.

위의 식(8)을 유한차분식으로 유도하면 아래식 (9)와 같다.

$$
\begin{aligned}
&(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k}(u_g^{n+1}-u_g^n)_{j,k}\Delta x_{j,k}+\frac{1}{2}(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k}\left[(u_g^2)^n_L-(u_g^2)^n_K\right]\Delta t-\frac{1}{2}\left[(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k}VISG^n_{j,k}\right]\Delta t\\
&+\frac{1}{2}\begin{bmatrix}(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k+1}(u_g^*)^n_{j,k+1}(v^n_{g,j,k+1}+v^n_{g,j-1,k+1})\\-(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k}(u_g^*)^n_{j,k}(v^n_{g,j,k}+v^n_{g,j-1,k})\end{bmatrix}\frac{\Delta x_{j,k}}{\Delta y_{j,k}}\Delta t=-(\alpha_g)^n_{j,k}(P_L-P_K)^{n+1}\Delta t\\
&+\left[(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k}g-(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k}FWG^n_{j,k}u_g^{n+1}-(\Gamma_g)^n_{j,k}(u_g-u_{g,I})^{n+1}_j\right]\Delta x_{j,k}\Delta t\\
&-\left[(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k}HLOSSG^n_{j,k}u^{n+1}_{g,j,k}\right]\Delta t-(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k}(u_g-u_f)^{n+1}_j\Delta x_{j,k}\Delta t\\
&+VIRTUAL\ \ MASS\ TERM\\
&+(\alpha_g)^n_{j,k}(\mu_g+\mu_{g,T})^n_{j,k}\left[(u^n_{g,j,k+1}-u^n_{g,j,k})\frac{1}{\Delta y_{j,k+1}}-(u^n_{g,j,k}-u^n_{g,j,k-1})\frac{1}{\Delta y_{j,k}}\right]\frac{\Delta x_{j,k}}{\Delta y_{j,k}}\Delta t
\end{aligned}
\tag{9}
$$

윗식을 3차원에 확장하려면 z-Direction까지 고려해야 하며 표현하면 아래식과 같다.

$$
\begin{aligned}
&(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k,l}(u_g^{n+1}-u_g^n)_{j,k,l}\Delta x_{j,k,l}+\frac{1}{2}(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k,l}\left[(u_g^2)^n_L-(u_g^2)^n_K\right]\Delta t-\frac{1}{2}\left[(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k,l}VISG^n_{j,k,l}\right]\Delta t\\
&+\frac{1}{2}\begin{bmatrix}(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k+1,l}(u_g^*)^n_{j,k+1,l}(v^n_{g,j,k+1,l}+v^n_{g,j-1,k+1,l})\\-(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k,l}(u_g^*)^n_{j,k,l}(v^n_{g,j,k,l}+v^n_{g,j-1,k,l})\end{bmatrix}\frac{\Delta x_{j,k,l}}{\Delta y_{j,k,l}}\Delta t\\
&+\frac{1}{2}\begin{bmatrix}(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k,l+1}(u_g^*)^n_{j,k,l+1}(w^n_{g,j,k,l+1}+w^n_{g,j-1,k,l+1})\\-(\alpha_g^*\rho_g^*)^n_{j,k,l}(u_g^*)^n_{j,k,l}(w^n_{g,j,k,l}+w^n_{g,j-1,k,l})\end{bmatrix}\frac{\Delta x_{j,k,l}}{\Delta z_{j,k,l}}\Delta t\\
&=-(\alpha_g)^n_{j,k,l}(P_L-P_K)^{n+1}\Delta t\\
&+\left[(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k,l}g-(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k,l}FWG^n_{j,k,l}u_g^{n+1}-(\Gamma_g)^n_{j,k,l}(u_g-u_{g,I})^{n+1}_{j,k,l}\right]\Delta x_{j,k,l}\Delta t\\
&-\left[(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k,l}HLOSSG^n_{j,k,l}u^{n+1}_{g,j,k,l}\right]\Delta t-(\alpha_g\rho_g)^n_{j,k,l}(u_g-u_f)^{n+1}_j\Delta x_{j,k,l}\Delta t+VIRTUAL\ \ MASS\ TERM\\
&+(\alpha_g)^n_{j,k,l}(\mu_g+\mu_{g,T})^n_{j,k,l}\left[(u^n_{g,j,k+1,l}-u^n_{g,j,k,l})\frac{1}{\Delta y_{j,k+1,l}}-(u^n_{g,j,k,l}-u^n_{g,j,k-1,l})\frac{1}{\Delta y_{j,k,l}}\right]\frac{\Delta x_{j,k,l}}{\Delta y_{j,k,l}}\Delta t\\
&+(\alpha_g)^n_{j,k,l}(\mu_g+\mu_{g,T})^n_{j,k,l}\left[(u^n_{g,j,k,l+1}-u^n_{g,j,k,l})\frac{1}{\Delta z_{j,k+1,l}}-(u^n_{g,j,k,l}-u^n_{g,j,l-1})\frac{1}{\Delta z_{j,k,l}}\right]\frac{\Delta x_{j,k,l}}{\Delta z_{j,k,l}}\Delta t
\end{aligned}
\tag{10}
$$

윗식은 x-Direction의 Vapor Phase에 대한 운동량 방정식이므로 각 3방향과 각 상에 대한 총 6개 Set의 방정식이 된다. 이를 풀기 위하여 Sum and Difference 형태로 식을 구성하여 해를 구한다. Convection Term과 Diffusion Term을 Explicit하게 구성하였으므로 Numerical Stability를 위하여 아래의 (11)과 같이 Courant Limitation과 Diffusion Limit을 동시에 고려하여야 한다 즉

$$\begin{aligned} \Delta t &\le \Delta x / u \\ \Delta t &\le \Delta x^2 / \left(\rho\left(\mu + \mu_T\right)\right) \end{aligned} \tag{11}$$

다차원 대류항은 하나의 Volume에 대하여 Volume을 구성하는 6개의 면 각각에 MARS의 Junction Component가 있는 것으로 요소를 설계하고 각 Junction에 대하여 운동량 방정식의 관련항들을 방향에 맞게 구성하여 완성된다. 식 (10)에서 *VISG*로 이루어진 항은 종래의 1D 계산에서 점성응력의 영향을 나타내주던 Parameter이다. 점성응력항을 난류와 연계하여 Explicit하게 구하는 1D MULTID 계산에서는 사용자 Input에서 *VISG* 값을 먼저 0으로 만들고 유효점성을 이용하여 *VISG*를 대체하게 하였다.

난류점성의 양은 Prandtl’s Mixing Length Theory를 응용하여 구하였다. Prandtl’s Mixing Length Theory는 난류점성을 Mixing Length와 주요 속도구배의 곱으로 나타낸 것으로써, 3D 상황의 주요속도구배는 일반적으로 Bulk Deformation Tensor를 이용하여 구한다. Cartesian Coordinate에서 Bulk Deformation Tensor를 이용한 주요속도구배는

$$\vec{D} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} & \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \\ \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} & 0 & \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \\ \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} & \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} & 0 \end{pmatrix} \tag{12}$$

$$\frac{\mu_T}{\rho} = \ell_m^2 \sqrt{2D \cdot D} \tag{13}$$

로 나타낼 수 있다. 이때, $\sqrt{2\vec{D} \cdot \vec{D}}$ 는 유한차분된 좌표계에서 적용이 용이하도록 식(14)와 같이 전환하여 구한다.

$$\sqrt{2\vec{D} \cdot \vec{D}} \cong \left|\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}\right| + \left|\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x}\right| + \left|\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y}\right| \tag{14}$$

이러한 방식은 Cylindrical Coordinate에도 동일하게 적용되며 Cylindrical Coordinate에서의 Bulk Deformation Tensor $D$는

$$\vec{D} = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} & \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} & 0 & \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} & \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial V_z}{\partial \theta} & 0 \end{pmatrix} \tag{15}$$

로 표현된다.

난류점성을 구하기 위해서는 주요속도구배와 함께 난류혼합특성 길이($\ell_m$)가 필요하다. 현재 MARS는 이 값을 사용자가 정하도록 하고 있으며 코드 내부에서 0.3으로 고정되어 있다. 다양한 유동조건에서 사용자 정의로 사용할 수 있는 난류특성길이를 표 2에 정리하였다.

표 2. Turbulent Mixing Length Scales for Various Simple Flow Geometries [6]

| Flow | Turbulent length scale, $\ell$ | Length scale, $L$ |
|---|---|---|
| Mixing layer | 0.07 $L$ | Layer width |
| Jet | 0.09 $L$ | Jet half width |
| Wake | 0.16 $L$ | Wake half width |
| Axisymmetric jet | 0.075 $L$ | Jet half width |
| Boundary layer<br>Viscous sub-layer<br>Log-law layer<br>Outer layer | 0.09 $L$ | Boundarylayer thickness |
| Channel | $L\left[0.14 - 0.08(1 - y/L)^2 - 0.06(1 - y/L)^4\right]$ | Channel half width |

## 3. 대류항의 검증

### 3.1 Pure radial flow

그림 2는 Cartesian Coordinate에서 대류항을 검증하기 위한 Pure Radial Flow의 개념도이다. 60도 각도만큼 반경방향으로 확대되는 3차원 채널로써, 두께는 1.0 m이다. 1기압 300K의 과냉액을 최외곽 Volume에서 주입하고 Volume내의 마찰을 무시한 상태에서 r-방향의 속도만으로 채널을 지나 내부 1번 Volume으로 유출되도록 하였다. 이때, 각 Volume의 속도와 압력의 변화를 추적하였다. MARS 2.2의 결과로 얻어진 반경방향의 속도와 압력을

Analytic Solution과 비교하여 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

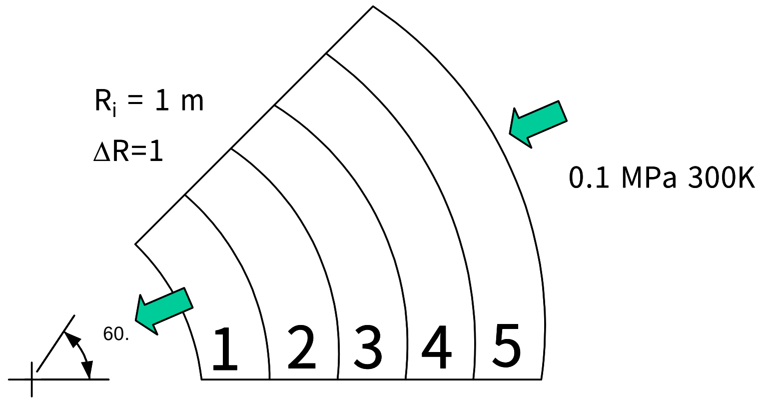



그림 2. Pure Radial Flow 개념도

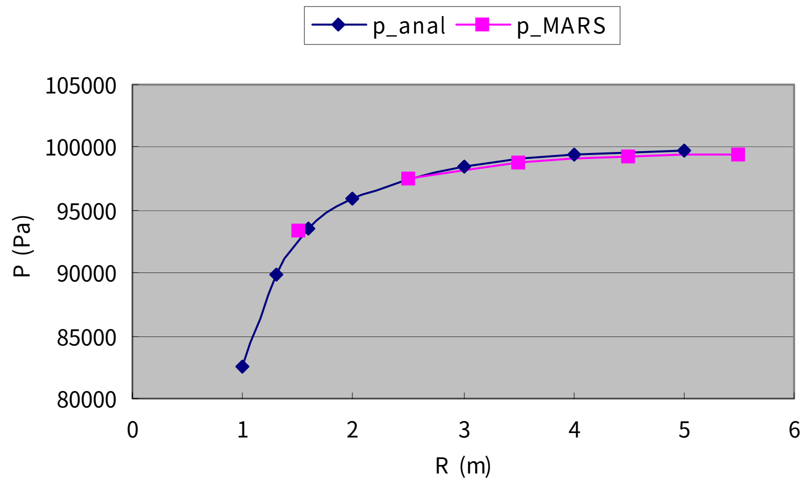



그림 3. Pure Radial Flow의 반경방향 압력분포 비교

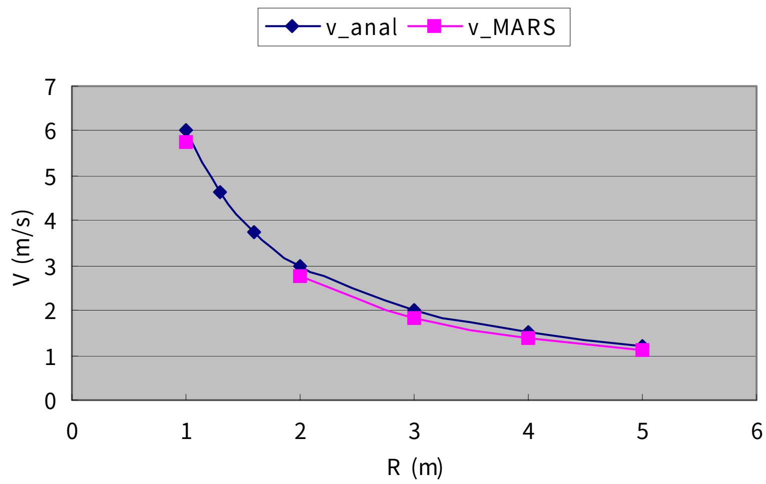
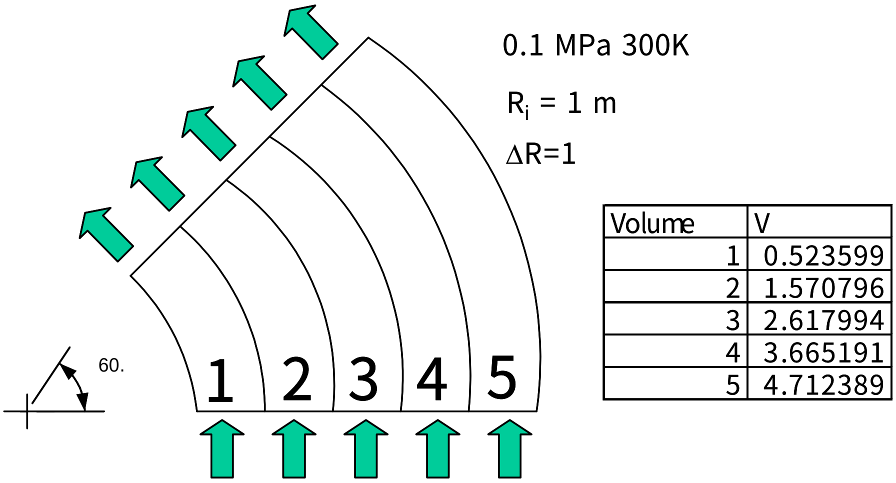



그림 4. Pure Radial Flow의 반경방향 속도분포 비교

여기서 Analytic Solution은 반경방향의 밀도를 압력에 따라 계산하지 않고 상수로 두었기 때문에 MARS의 결과와 약간의 오차가 나타나고 있으나 최대오차는 0.3% 이내에 있다. 이 개념문제는 반경방향으로 변화하는 유동면적에 따라 속도의 변화가 올바로 계산되고 있는가를 알아보고자 하는 것이다.




| Volume | V |
|---|---|
| 1 | 0.523599 |
| 2 | 1.570796 |
| 3 | 2.617994 |
| 4 | 3.665191 |
| 5 | 4.712389 |

그림 5. Pure Azimuthal Flow의 개념도

## 3.2 Pure Azimuthal Flow

Pure Radial Flow와 동일한 형상을 가지는 채널에서 각 반경방향 Volume이 모두 Azimuthal 방향의 속도만을 가지도록 하였다. 초기에 주어지는 반경방향의 속도는 Analytic Solution으로 계산된 결과이다. 각 Volume의 속도값은 그림 5에 개념도와 같이 나타내었다.

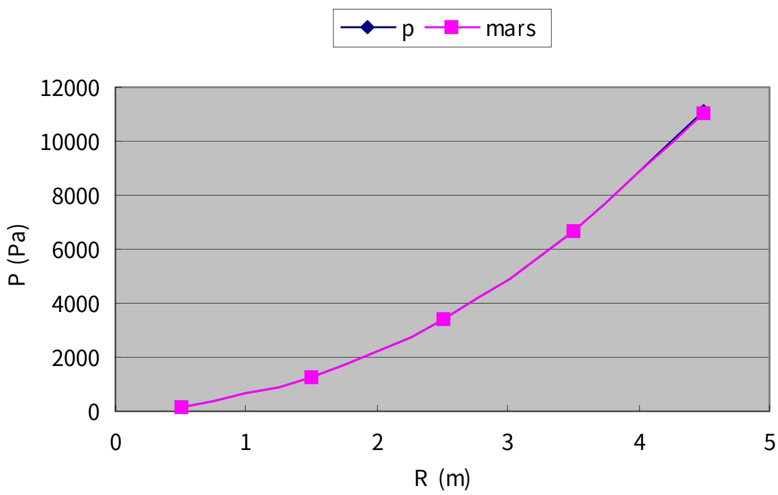



그림 6. Pure Azimuthal Flow의 반경방향 압력분포 비교

이 개념문제는 Equilibrium상태로 회전하는 유동내부의 압력분포를 알아보는 것으로써, Cylindrical Coordinate의 가장 중요한 특성인 원심력의 효과가 올바로 계산되고 있는지

알아보는 것이 주된 목표이다. 그림 6에서 보듯이 Analytic Solution과는 0.2%이내의 오차를 보이고 있다.

### 3.3 Large Block Problem

이 문제는 Cartesian Coordinate에서 Lateral Velocity가 개입된 대류항을 평가하기 위한 것이다. 이미 Impinging Flow 상황에서 유동의 확산을 검증하였으나 2차원 평면유동의 성격만을 가지고 있으므로 xyz의 세 축방향으로 모두 유동속도를 가지는 3차원 유동은 넓은 Volume을 가지고 수행하기로 하였다. Block의 크기는 1.8x1.8x2.4이고 각 방향으로의 노드 길이는 모두 0.3 m로 하였다. 하부에서 1.5 MPa, 400K의 과냉액이 8 m/s로 주입된다. Volume 내부에서 x-방향의 속도를 표시하기 위한 $V_x$ View Plane은 x=0.9 m 지점에 위치하고 있으며, $V_y$ Plane 은 y=0.3 m 지점에 위치하고 있다. 각 View Plane의 속도를 Bitmap으로 나타낸 그림 8의 결과를 보면 Block 하부에서 주입구 쪽으로 형성되는 역류현상이 나타나고 있으며 점성응력항이 포함되지 않아 Volume 중심부와 벽면부의 속도차이가 대체로 크게 나타나고 있다.

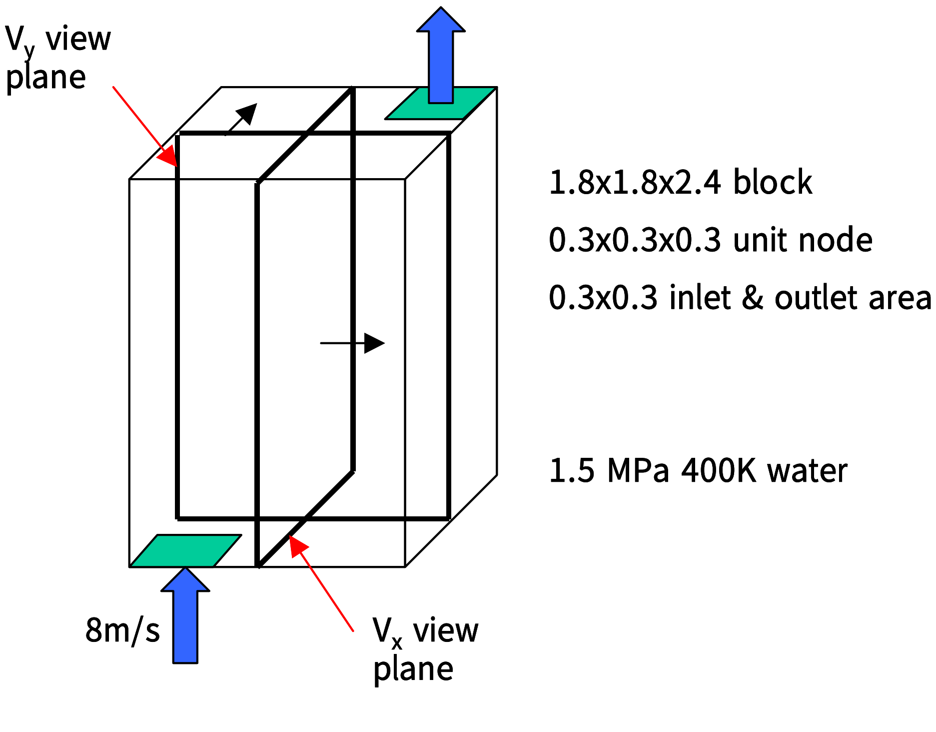
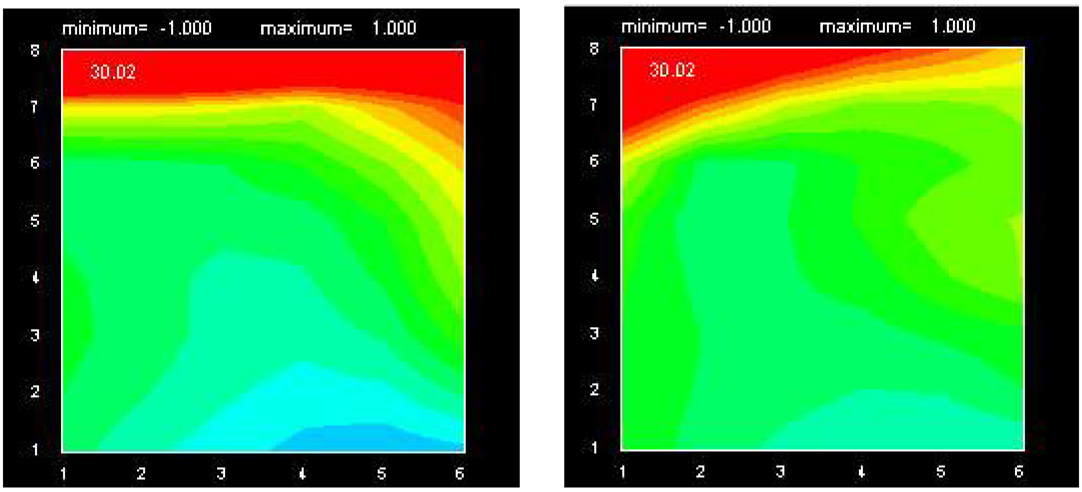



그림 7. Large Block Problem의 개념도




(a) x-direction velocity ($V_x$) (b) y-direction velocity ($V_y$)

그림 8. Large Block Problem의 속도장 계산결과 (-1.0 to 1.0 m/s range)

## 4. 점성응력항의 검증

### 4.1 Expansion Pipe

그림 9는 Expansion Pipe의 대략적인 그림이다. 반경이 0.01 m씩 증가하는 5개의 동심형 Volume이 하나의 큰 Pipe를 구성하고 있다. Pipe의 길이는 0.9 m로써, 0.1 m씩 9구간으로 노딩되어 있다. 중앙부 Volume의 하부에서 0.5 m/s로 주입되는 과냉액은 1.5MPa, 400K의 상태를 유지하고 있다. 점성응력항을 포함한 관류를 보고자 하는 것이므로 일반적인 CFD 코드인 FLUENT와 연계한 비교가 가능하다. 난류점성값을 계산하는데 필요한 혼합특성길이는 주입구 반경과 같은 0.01 m로 전체 Volume내에서 고정되어 계산된다. $\theta$-방향으로의 노딩을 4개로 하였으나 $\theta$-방향의 속도구배와 관련된 응력은 발생하지 않아야 한다.

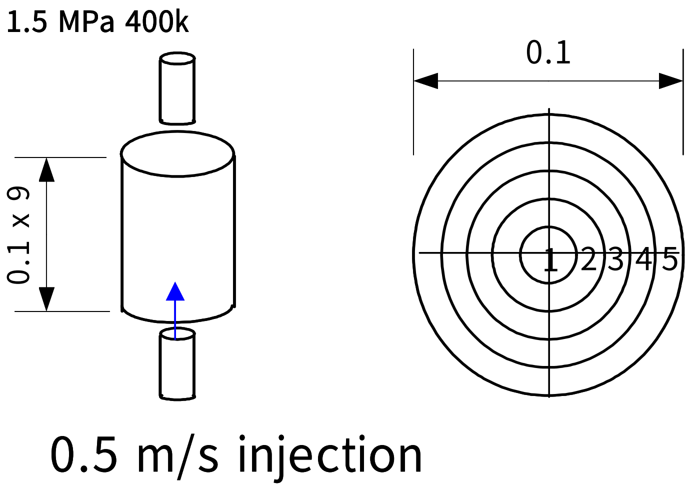
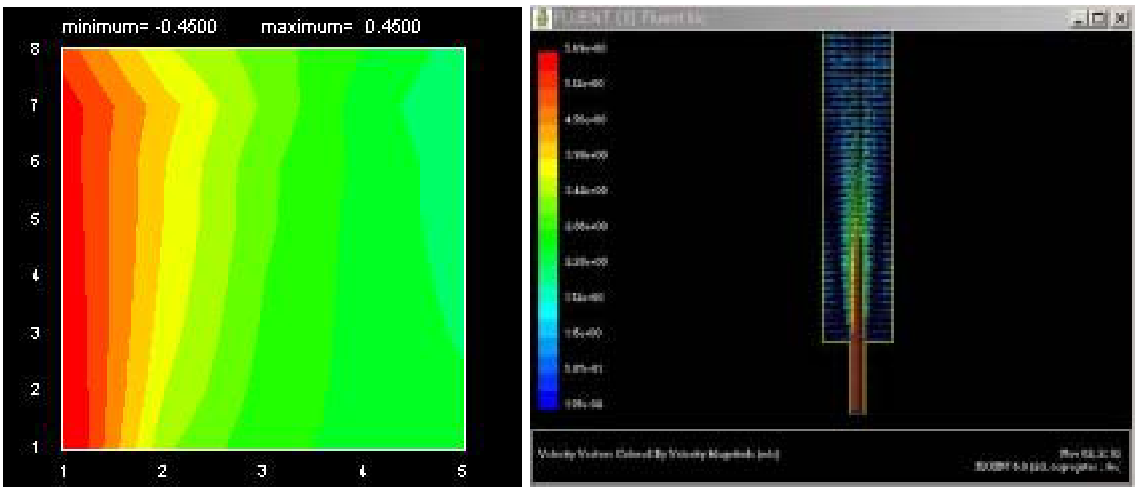



그림 9. Expansion Pipe문제의 개략도




(a) MARS 결과　　　　　　　　　　(b) FLUENT 결과

그림 10. Expansion Pipe Problem의 축방향 속도 계산결과 비교

그림 10의 FLUENT 결과는 MARS 노딩에 사용된 Grid보다 Fine한 노딩으로 계산한 것이다. 난류모델로는 Standard $k$-$\varepsilon$ Model을 적용하였고 주입속도와 온도, 압력은 동일하게 두었다. 입구근처 벽면에서 역류현상이 모두 발견되고 있으나 MARS의 경우에는 주입구에서 분사된 제트의 영향이 매우 오래 지속되는 것으로 나타난다. 이는 Prandtl’ s Mixing Length Theory 에 의해 계산된 난류점성값이 작게 계산되기 때문으로 판단된다.

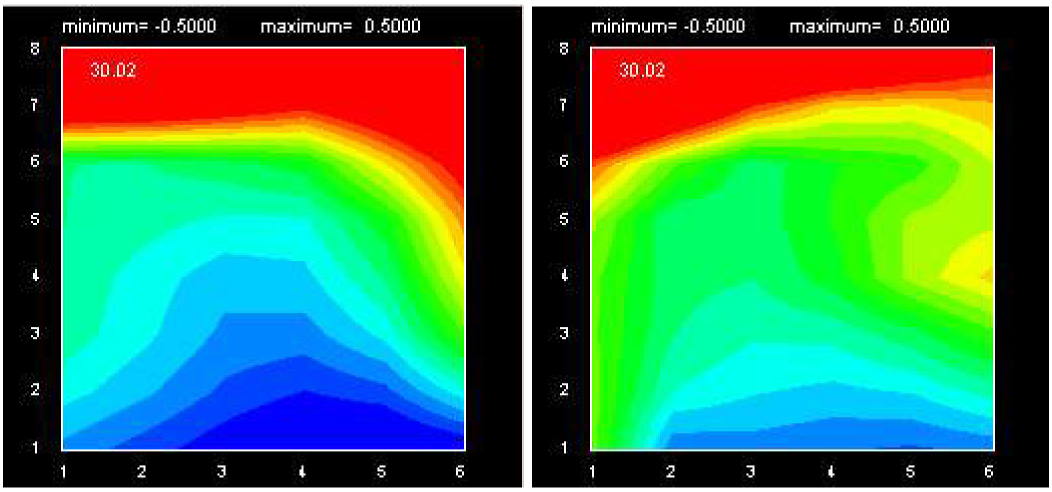
## 4.2 Large Block Problem with Turbulence

3.3절과 그림 7에 설명된 것과 같은 형태의 문제로 MARS에 적용된 Cartesian Coordinate의 난류점성 모델을 살펴보았다. 같은 경계조건과 주입구의 과냉액 속도 등이 사용되었으며 MARS 코드 내부에서 난류점성을 계산하고 점성응력에 관한 항이 추가되도록 하였다.

그림 11은 계산결과를 각각 $V_x$ View Plane과 $V_y$ View Plane에서 나타낸 것이다. 3.3절에서 볼 수 있었던 벽면 근처의 속도가 완화되었고 하부 모서리 부근에서는 역류현상이 3차원적으로 일어나고 있음을 알 수 있다. 그림 11 (b)를 보면, y축 방향으로 Block 하부에서는 매우 큰 확산류가 분포하는것으로 보인다. $V_x$ View Plane이 위치한 Block의 중간지점에서는 하부 모서리근처의 국소에서 역류가 크게 나타난다. Y-축 방향으로 동일 지점에서는 대칭적인 결과가 나타나고 있다. 그림 11 (a)의 우측 상단이 출구에 가까운 쪽이다. Block 중간 부분에서는 완만한 속도경향을 보이고 있고 출구에 가깝게 접근하면서 속도증가가 나타나고 있다.

난류혼합특성 길이를 계산하기 위해 일반적 혼합경계층(mixing layer) 값을 이용하였고 ($\ell_m = 0.07L$), 경계층 특성길이 $L$로는 주입구 직경(=0.3m)을 적용하였다. 이것은 난류점성의 영향이 주입구 부근에서 중요하게 다루어져야 하기 때문이다. 주입구 부근의 난류 계산이

정확해야만 이후 Block 전체의 유동 양상이 올바로 전개되고 FLUENT를 이용한 CFD관점의 계산과 일관성을 찾을 수 있다.




(a) $V_x$ (b) $V_y$

그림 11. 난류점성이 포함된 MARS 코드 결과 (-0.5 to 0.5 m/s range bitmap)

그림 11과 비교하기 위해 FLUENT 계산결과를 동일위치의 평면에서 나타내었다. FLUENT로 얻어진 $V_y$ 와 MARS 결과의 $V_y$ 를 비교하면 유체 입구부분에서 주입되는 제트류에 끌려서 역방향의 유동이 형성되는 경향을 같이 나타내고 있음을 알 수 있다. MARS 결과에서는 Block 중간부 평면($V_x$ Plane)에서 하층역류가 매우 강하고 광범위하게 나타나고 입구근처의 평면에서 약하게 나타나고 있으나 FLUENT 결과에서는 두 평면 모두에서 하층역류가 비슷한 규모의 영역에서 일어나고 있다.

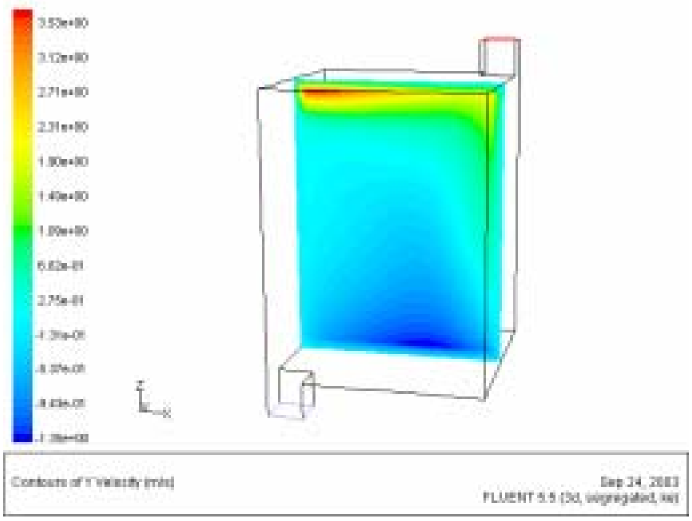


그림 12. FLUENT 계산결과로 얻어진 $V_x$ 분포

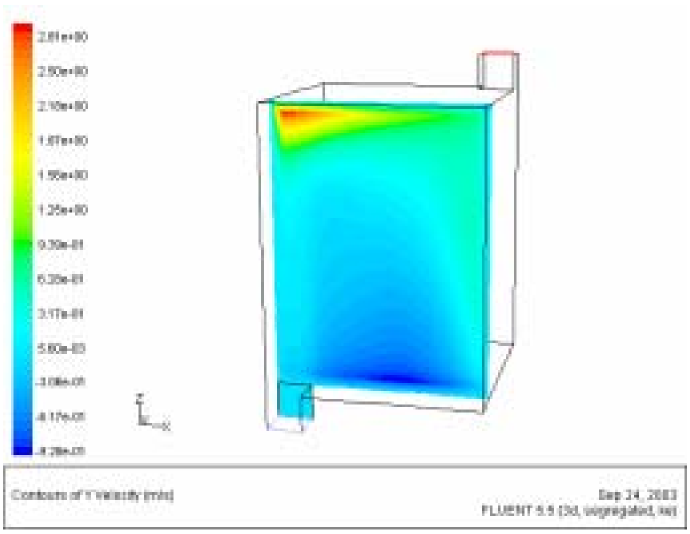


그림 13. FLUENT 계산결과로 얻어진 $V_y$ 분포

## 5. 결론 및 논의

MARS 1D 모듈내에 다차원 형상의 입력과 해석이 가능한 MULTID Component를 새로 개발하고 이를 검증하였다. 검증은 직교 좌표계와 원통형 좌표계 각각에 대하여 Lateral Velocity가 포함된 대류항과 점성응력항의 성공적 적용 여부에 초점을 맞추어 수행하였다. 새로 추가한 이러한 항들은 모두 Explicit Scheme으로 수용되었으며 난류점성을 계산하기 위해 Prandtl’s Mixing length Theory를 이용하였다. 각 좌표계에서 살펴본 결과, 매우 양호한 점성응력항의 동작을 확인하였으며 이후 혼합특성길이의 국소화를 위해 추가적인 코드 수정이 MARS의 새 버전에 맞추어 발표될 예정이다.

## 참고문헌


[1] 이원재 외 “ 원자력 열수력 실증실험 및 평가기술개발/ 최적열수력계통분석코드 개발” , KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소 (2002)

[2] 정법동 외, “ MARS2.2 Code manual, Input requirements” , KAERI/TR-2529/2003, 한국원자력연구소 (2003)

[3] C.W. Stewart, J.S. Barnhart, and A.S. Koontz, Improvements to the COBRA-TF (EPRI) Computer Code for Steam Generator Analysis, EPRI NP-1509 (1980).

[4] RELAP5/3D Development Team, “ RELAP5/3D Code Manuals, Volumes I, II, IV,

and V," Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL- EXT-98-00834, Revision 1.1b. (1999)

[5] Kelly, J. M., TRAC-M Code Consolidation and Development, Fall 2002 CAMP Meeting, Alexandria, Virginia Sponsored by USNRC, October 31 (2002)

[6] K. K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, LONGMAN (1995).

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.