2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MARS 코드에의 전단 응력과 3 차원 운동량 대류 항 적용 및 이상유동의 영향분석

Implementation of shear stresses and 3 dimensional momentum convection term into MARS code and an analysis of effects on the two phase fluid flow

정법동
한국 원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

오승종
한국수력원자력 주식회사
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

이상유동의 3 차원적인 해석을 하기 위하여는 운동량 보존식에서 주 방향 뿐만 아니라 횡 방향으로의 대류 항을 고려하여야 하며 전단응력까지도 고려하여야 필요가 있다. 3 차원적인 대류 항을 고려하고 있는 열수력 계통분석코드로는 TRAC, RELAP5-3D, CATHARE 등이 있으며 MARS 코드도 3 차원 모듈에 이러한 대류 항과 난류혼합을 고려하고 있다. MARS 코드는 RELAP5/MOD3 로부터 발전시킨 1 차원 모듈과 COBRA-TF 로부터 발전시킨 3 차원 모듈의 결합으로 구성된 코드로 1 차원 모듈과 3 차원 모듈은 서로 다른 상간 관계식과 장방정식을 사용하고 있다. 따라서 현재의 MARS 코드로는 3 차원 유동 특징 만으로 발생하는 영향을 분석하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 3 차원 적인 운동량 대류 항 뿐 아니라 전단응력까지 고려하여 MARS 코드의 1 차원 모듈에 적용하여 3 차원 분석에 적합하도록 확장하였으며 2 차원적인 강수관과 3 차원적인 노심의 간단한 구조에 대하여 단상유동 및 이상유동장에의 영향을 분석하였다.

Abstract

Not only the main and lateral momentum convection term but also the shear stress term should be considered in the momentum equations for the calculation of full three dimensional flow field of two phase flow. Some of the thermal-hydraulic system codes such as TRAC, RELAP5-3D and CATHARE have been developed for the analysis of 3D field calculations by considering the full 3D momentum convection *terms. The 3D module of MARS code also has the feature of 3D flow calculation of turbulence mixing model. The MARS code consists of 1D module which has been developed from RELAP5/MOD3 and 3D module which has been developed from COBRA-TF. Since the 1D and 3D module of MARS use the different set of interfacial correlations and field equation, it has a limited capability to the analysis of the separated 3D flow effect. The 3D momentum convection term and shear stress term have been implemented for MARS 1D module in order to extend its capability of 3D flow field calculation. Verification calculations of MARS implementation have been performed for the simple geometry of the slab downcomer and core. The effect on the single and two phase flow field has been discussed also.*

1. 서론

계통 열수력 안전해석코드에서 3 차원적 열수력 해석을 위한 노력은 오래 전부터 이루어져 왔으며 TRAC[1]코드의 VESSEL Component 는 1980 년대 초에 이미 3 차원 분석을 할 수 있게 설계가 되었으며 CATHRE[2,3]코드도 CATHARE-2 v1.4 부터 3 차원 분석이 가능하게 개발되어 있다. RELAP5[4]코드는 1990 년 대 말경에 NRC 의 1 차원해석 코드인 RELAP5/MOD3.2 로부터 독립적으로 RELAP5-3D[5] 버전으로 개발된 바 있다. COBRA-TF 코드는 부수로 해석코드인 COBRA 코드로부터 발전하여 2 상 유체와 3 차원 유동을 다룰 수 있게 하였다. COBRA-TF 코드는 후에 TRAC 코드와 결합하여 COBRA/TRAC[6]으로 3 차원 LOCA 계통분석을 할 수 있게 하였으며 그 뒤 Westinghouse 가 개선하여 산업체 코드로 활용하고있다. MARS[7]코드는 1 차원 계통코드인 RELAP5/MOD3 와 COBRA-TF 의 결합과 개선을 통하여 개발된 코드로 선택적으로 3 차원 계통분석을 할 수 있다.

이렇듯 오래 전부터 3 차원 계통분석에 많은 연구가 이루어져 왔으나 최근 전산기 속도의 대폭적인 향상으로 최소 수천개의 노드로 계통분석을 하고자 하는 노력이 진행됨에 따라 수백개의 노드로는 고려하고 있지 않았던 난류유동을 포함한 전단응력의 영향까지도 계통 분석에서 고려하고자 하고있다. 물론 FLUENT 나 CFX 코드와 같은 상용전산유체코드와 계통분석코드와의 결합을 통하여 이러한 분석을 하고자 하는 노력도 있으나 LOCA 등과 같이 이상유동이 심하게 발생하는 사고에 대하는 현재의 상용전산유체코드의 적용에 아직 한계가 많은 실정이다. 본 논문의 목적은 열수력계통분석코드인 MARS 일차원 모듈에 3 차원적인 운동량 대류항과 전단 응력항을 적용하여 기존의 일차원 적인 유동장 계산에 영향을 분석하고 향후 더 필요한 3 차원 유동모델의 개발 방향을 논의하기 위함이다.

2. MARS 일차원 모듈의 기본 방정식 과 3차원 유동으로의 확장식

MARS 코드의 일차원 모듈에서 사용하고 있는 기본식은 다음과 같다.

질량보존방정식

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

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

운동량보존방정식

$$\alpha_g \rho_g A\frac{\partial u_g}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_g \rho_g A\frac{\partial u_g^2}{\partial x^2}=-\alpha_g A\frac{\partial P}{\partial x}+\alpha_g \rho_g B_x A-\left(\alpha_g \rho_g A\right)FWG\left(u_g\right)+\Gamma_g A\left(u_{g,I}-u_g\right)$$
$$-\left(\alpha_g \rho_g A\right)FIG\left(u_g-u_f\right)-C\alpha_g \alpha_f \rho_m A\left[\frac{\partial\left(u_g-u_f\right)}{\partial t}+u_f\frac{\partial u_g}{\partial x}-u_g\frac{\partial u_f}{\partial x}\right] \qquad (3)$$

$$\alpha_f \rho_f A\frac{\partial u_f}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_f \rho_f A\frac{\partial u_f^2}{\partial x^2}=-\alpha_f A\frac{\partial P}{\partial x}+\alpha_f \rho_f B_x A-\left(\alpha_f \rho_f A\right)FWF\left(u_f\right)-\Gamma_g A\left(u_{f,I}-u_f\right)$$
$$-\left(\alpha_f \rho_f A\right)FIF\left(u_f-u_g\right)-C\alpha_g \alpha_f \rho_m A\left[\frac{\partial\left(u_f-u_g\right)}{\partial t}+u_g\frac{\partial u_f}{\partial x}-u_f\frac{\partial u_g}{\partial x}\right] \qquad (4)$$

에너지 보존방정식은 편의상 생략하였다. 위 식을 3 차원 유동에 대하여 확장시키면 아래식과 같이 된다.

질량보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_g \rho_g\right)+\frac{1}{A_x}\frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_g \rho_g u_g A_x\right)+\frac{1}{A_y}\frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha_g \rho_g v_g A_y\right)+\frac{1}{A_z}\frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha_g \rho_g w_g A_z\right)=\Gamma_g$$

(5)

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_f \rho_f\right)+\frac{1}{A_x}\frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_f \rho_f u_f A_x\right)+\frac{1}{A_y}\frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha_f \rho_f v_f A_y\right)+\frac{1}{A_z}\frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha_f \rho_f w_f A_z\right)=\Gamma_f$$

단상유동에서 3 차원 운동량 보존식을 벡터형태로 나타내면 다음식과 같다.

$$\rho\left(\frac{\partial\vec{V}}{\partial t}+\vec{V}\bullet\nabla\vec{V}\right)=-\nabla P+\overline{\sigma}+\rho\vec{f} \tag{6}$$

직각 좌표계에서 운동량 대류항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\vec{V}\bullet\nabla\vec{V}&=u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}:x-component\\&=u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}:y-component\\&=u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}:z-component\end{aligned} \tag{7}$$

원통형 좌표계에서는

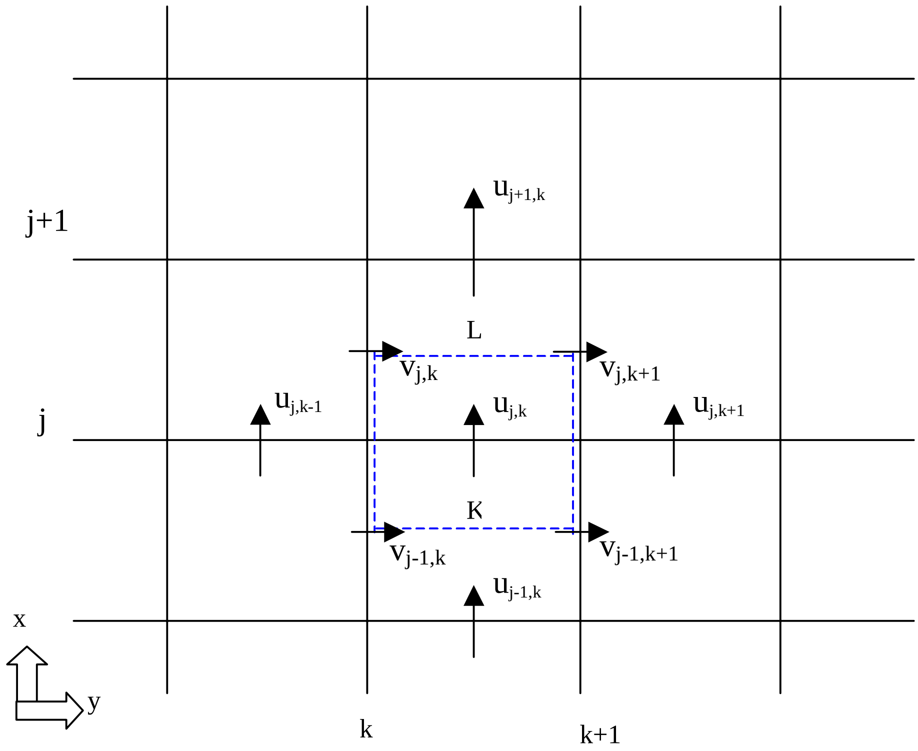
$$\begin{aligned}\vec{V}\bullet\nabla\vec{V}&=u\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial u}{\partial\theta}+w\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{v^2}{r}:r-component\\&=u\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial v}{\partial\theta}+w\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{uv}{r}:\theta-component\\&=u\frac{\partial w}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial w}{\partial\theta}+w\frac{\partial w}{\partial z}:z-component\end{aligned} \tag{8}$$

윗식 중 직각 좌표계에서의 식을 이상유동식에 적용하고 전단응력을 고려하면 x 방향의 기상 운동량 보존식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}&\alpha_g\rho_g A\frac{\partial u_g}{\partial t}+\frac{1}{2}\alpha_g\rho_g A\frac{\partial u_g{}^2}{\partial x}+\alpha_g\rho_g Av_g\frac{\partial u_g}{\partial y}+\alpha_g\rho_g Aw_g\frac{\partial u_g}{\partial z}=\\&-\alpha_g A\frac{\partial P}{\partial x}+\alpha_g\rho_g B_x A-\alpha_g\rho_g A(FWG)u_g+\Gamma_g A(u_{gI}-u_g)-\alpha_g\rho_g A(FIG)(u_g-u_f)\\&-C\alpha_g\alpha_f\rho_m A\left[\frac{\partial(u_g-u_f)}{\partial t}+u_f\frac{\partial u_g}{\partial x}-u_g\frac{\partial u_f}{\partial x}\right]+\alpha_g A(\mu_g+\mu_{g,T})\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right]\end{aligned} \tag{9}$$

이를 유한 차분 식으로 나타내기 위해 다음 그림과 같은 편의상 2 차원 노딩을 고려한다.

그림에서 볼륨은 수직방향이 x 방향이며 수평방향이 y 방향으로 가정한다.



대류항에 대하여 Upwind scheme 을 적용시킨 유한 차분식을 유도하면 아래식과 같다.

$$(\alpha_g \rho_g)^n_{j,k}\left(u_g^{n+1} - u_g^n\right)_{j,k} \Delta x_{j,k} + \frac{1}{2}(\alpha_g^* \rho_g^*)^n_{j,k}\left[(u_g^2)^n_L - (u_g^2)^n_K\right]\Delta t - \frac{1}{2}\left[(\alpha_g^* \rho_g^*)^n_{j,k} VISG^n_{j,k}\right]\Delta t$$

$$+\frac{1}{2}\left[(\alpha_g^* \rho_g^*)^n_{j,k+1}(u_g^*)^n_{j,k+1}\left(v^n_{g,j,k+1} + v^n_{g,j-1,k+1}\right) - (\alpha_g^* \rho_g^*)^n_{j,k}(u_g^*)^n_{j,k}\left(v^n_{g,j,k} + v^n_{g,j-1,k}\right)\right]\frac{\Delta x_{j,k}}{\Delta y_{j,k}}\Delta t$$

$$= -(P_L - P_K)^{n+1}\Delta t + \left[(\alpha_g \rho_g)^n_{j,k}\, g - (\alpha_g \rho_g)^n_{j,k} FWG^n_{j,k} u_g^{n+1} - (\Gamma_g)^n_{j,k}\left(u_g - u_{g,I}\right)^{n+1}_j\right]\Delta x_{j,k}\Delta t$$

$$-\left[(\alpha_g \rho_g)^n_{j,k} HLOSSG^n_{j,k} u^{n+1}_{g,j,k}\right]\Delta t$$

$$-(\alpha_g)^n_{j,k}\left(\mu_g + \mu_{g,T}\right)^n_{j,k}\left[\left(u^n_{g,j,k+1} - u^n_{g,j,k}\right)\frac{1}{\Delta y_{j,k+1}} - \left(u^n_{g,j,k} - u^n_{g,j,k-1}\right)\frac{1}{\Delta y_{j,k}}\right]\frac{\Delta x_{j,k}}{\Delta y_{j,k}}\Delta t$$

위 식을 일반적인 3 차원에 확장하기 위해 z 방향에서의 대류 항과 전단응력을 고려하면 아래식과 같다.

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

이식은 x 방향의 기상에 대한 운동량 보존식이므로 전체 운동량 보존식은 각 x-y-z 방향과 액상과 기상으로 구성된 총 6 개의 방정식이 된다. 위식에서 보듯이 대류 항과 전단응력의 확산 항 모두를 explicit 형태로 유한 차분 해를 구성하였으므로 수치적 안정성을 위하여 Courant 한계와 diffusion 한계를 동시에 고려하여야 코드에 적용하여야 한다. 그러나 explicit 항으로 처리하였으므로 전체 계통 압력행렬방정식의 단지 소스 항에 추가사항이 있으며 구성 행렬의 요소의 변화가 없으므로 비교적 쉽게 MARS 코드에 적용할 수 있는 형태가 된다.

3. 3차원 유동 차분식의 MARS코드 일차원 모듈에의 적용

MARS 코드의 일차원 모듈은 그 입력 구조상 직각 좌표계에서 3 차원 볼륨에 대한 기하학적 구조를 입력할 수 있도록 설계되어 있다. 즉 MARS 코드의 일차원 모듈은 INEEL 의 RELAP5-3D 버전을 위한 중간단계로서의 USNRC RELAP5/MOD3 버전으로 출발하였기 때문에 유동면적, 길이, 수력학적직경, roughness, 볼륨속도 그리고 유동양상에 대하여 3 차원 배열로 구성되어 있다. 또한 볼륨 유속 및 중력 항도 3 차원 배열로 구성하여 x-y-z 방향으로 운동량 방정식을 구성할 때 사용할 수 있게 하였다. 유한 차분해를 살펴보면 K 볼륨에서 L 볼륨으로 가는 junction 의 3 차원적 운동량 해를 위하여 필요한 인접속도의 인덱스는 K 볼륨의 각 면에서의 속도인덱스, L 볼륨에서의 각면의 속도인덱스, 그리고 j junction 주위의 6 개 junction 의 인덱스가 필요하다. 또한 각 볼륨이 벽면을 접하고 있는지를 알려주는 6 면의 인접 볼륨 인덱스도 필요하다. 이를 위해 수정된 볼륨 모듈에서 추가된 vface(6), jface(6) 와 junction 모듈에서 추가된 jface(6) 변수는 다음과 같다.

```
MODULE VOL_DAT
     TYPE VOLUME_HEADER
        INTEGER nvols(2)
     END TYPE
     TYPE VOLUME_DATA; SEQUENCE
.
.
.   (중략)
.
.
         INTEGER vface(6),jface(6)
     END TYPE
     TYPE(VOLUME_HEADER)              :: v_hd
     TYPE(VOLUME_DATA), ALLOCATABLE    :: v_da(:),v_dax(:)
END MODULE VOL_DAT
```

```
MODULE JUN_DAT
     TYPE JUNCTION_HEADER
        INTEGER njuns(2)
     END TYPE
     TYPE JUNCTION_DATA ; SEQUENCE
        INTEGER ij1(2),ij2(2),ij1vn(2),ij2vn(2),junftl(2,2)
        INTEGER jface(6)
.
.
.  (중략)
.
.
     END TYPE
     TYPE(JUNCTION_HEADER)            :: j_hd
     TYPE(JUNCTION_DATA),ALLOCATABLE   :: j_da(:), j_dax(:)
END MODULE JUN_DAT
```

MARS 의 VEXPLT 부 프로그램에서 운동량 보존식의 explicit 대류 항과 전단응력을 사용자 옵션으로 선택할 수 있도록 수정하였다. 즉 3 차원 운동량 대류항만을 고려할 경우는 사용자 옵션 67 을 사용하고, 전단응력까지 고려할 경우는 옵션 68 을 사용할 수 있게 유한 차분 식을 적용하였다.

4. 수정된 MARS 코드의 다차원 유동 검증계산

다차원 유동식의 적용을 검증하기 위하여 다음과 같은 2D 및 3D 문제를 설정하고 MARS 코드로 검증계산을 수행하였다.

4.1 2D 개념문제에 대한 다차원 유동 검증

본 개념문제는 APR1400 과 같은 직접주입의 강수관에서 실질적으로 일어나는 현상을 단순화 하기 위하여 간단한 기하학적인 구조와 경계조건을 가정하여 강수관 내의 증기와 water film 유동장의 형성과 그 두 유동장의 상호작용(열 및 물질전달이 없는 경우인 운동량에 대한 분리 상호작용)에 대하여 검토하였다. 그림 1 에서 보는 바와 같이 중앙부분에 포화 증기를 주입하고 같은 높이에 출구를 양단에 설정하였다. 안전주입은 양측 상단에서 주입되는 것으로 가정하였다.

1) 문제 1

포화 증기만을 50 m/sec 로 주입하였을 때 증기유동장의 형성의 타당성

2) 문제 2

안전 주입수만을 1 m/sec 로 주입하였을 때 water film 의 형성 타당성

3) 문제 3

문제 1)에서 형성된 유동장에 안전 주입수를 1m/sec 로 주입하였을 때 water film 의 형성 및 유동장에 미치는 영향

4) 문제 4

문제 1)에서 유로 저항으로 고온관을 설치하였을 때 형성되는 유동장

본 개념문제는 강수관에서 일어나는 현상은 2 차원적인 유동이나 실질적으로 증기나 안전주입이 주입되는 부분은 3 차원적인 문제이다. 각 x-y-z 방향의 기하학적인 자료와 6 면의 각 볼륨면에 연결된 junction 을 입력할 수 있게 하였다. 그림 2 에서 보는 바와 같이 강수관을 9 개의 환형 채널로 모의하고 각 채널 사이에 cross flow 를 연결하였다. 또한 증기 및 안전수 주입부위는 아래의 옵션과 같이 3 차원적인 모델링을 하였다.

1) Option 1

각 채널끼리 연결된 y-방향 cross flow junction 에 대하여 주방향의 momentum flux term 을 무시하고 정적 압력차이에 의하여 유동이 형성되는 경우

입력 예)

```
******************************************************************************
** Cross Flow Junction of the lower annulus
1500000   to_200    mtpljun
1500001   9         1
1500011   100010004       200010003       0.10000          0.0      0.0      000003
1500012   1.0       1.0       1.0
1500013   10000     10000     0         9
1501011   0.0       0.0       9
1502011   0.00000          0.0      1.0      1.0      9
```

2) Option 2

각 채널끼리 연결된 y-방향 cross flow junction 에 대하여 주방향 momentum flux term 을 감안하는 경우

입력 예)

```
*******************************************************************************
** Cross Flow Junction of the lower annulus
1500000   to_200    mtpljun
1500001   9         1
1500011   100010004        200010003        0.10000        0.0     0.0     000000
1500012   1.0       1.0       1.0
1500013   10000     10000     0         9
1501011   0.0       0.0       9
1502011   0.00000            0.0       1.0       1.0       9
```

3) Option 3

각 채널끼리 연결된 cross flow junction 에 대하여 주방향 momentum flux term 을 감안하고 횡방향 momentum flux 도 감안하는 경우, 즉 3D momentum flux term 이 고려되는 경우.

각 문제에 대하여 MARS 계산을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 문제 1 : 증기 유동장 계산의 타당성

증기가 50 m/sec 로 중앙 평판에서 수직방향으로 주입되는 경우는 비교적 단순한 유동으로 직관적인 potential 유동에서 일단은 동심원 방향으로 유동이 형성되었다가 양단 출구 끝으로 치우치는 유동이 형성되어야 한다. 그림 3 은 각 유동옵션에 대한 증기 유동장 계산치를 보여주고 있다. 원주방향의 momentum flux 를 고려하지 않은 경우 (Option 1)는 1 차적으로 증기 주입부위에서는 물질 보존칙으로 인하여 r-z 방향으로 균등하게 분할되나 시간이 진행되면서 축 방향인 z-방향 momentum flux term 의 영향으로 r-방향의 유동이 커지게 된다. r-z 각 주방향의 momentum flux 를 고려하지만 횡 방향 momentum flux 를 고려하지 않은 경우 (Option 2)는 주입부위에서 r-z 방향으로만 유동이 형성된 후 벽면에서 연속법칙으로 인하여 방향이 출구로 향하는 유동이 형성된다. 동심원방향으로 유동이 형성되지 못하는 이유로는 좌표계가 직각 좌표계로 본 유동에 맞지 않은 좌표계를 사용하였기 때문이다. 3 차원 momentum flux (Option 3)를 감안하였을 때는 유동장이 직각 좌표계를 사용하였음에도 불구하고 좀더 현실적인 유동장이 된다. 그 이유로는 일단은 횡방향 momentum flux 를 감안하였으며 또한 난류유동혼합의 영향으로 주입부분에서 r-z 방향 유동이 확산되어 동심원의 유동에 가깝게 되었기 때문이다. 물론 더 정확한 CFD 계산에 의하면 각 4 모서리에서 유동점성의 영향으로 2 차유동 및 더 복잡한 와류가 계산 되겠지만 1m x 1m 정도의 mesh 사이즈로는 이 정도의 정밀도로 만족할 만 할 것으로 판단된다.

2) 문제 2 : Water film 형성계산의 타당성

z-방향에 수직으로 주입된 물은 제트의 영향으로 동심원으로 film 을 형성하였다가 중력에 의하여 z-방향으로 가속되면서 점점 film 이 얇아진다. 뿐만 아니라 반경방향의 잔류 momentum flux 의 영향으로 film 너비도 넓어지기 때문에 더욱 얇아지는 효과를 더하게 된다. 그림 4 는 각 경우에 대한 water film 을 나타내고 있으며 film 이 얇게 형성되기 때문에 void fraction 을 0.9 ~ 1.0 사이의 값을 균일 등분하여 색으로 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 r-방향 momentum flux 를 감안하지 않은 경우가 water film 이 주입부근에서 가장 확산이 심하며, 3 차원의 momentum flux 를 감안하는 경우는 film 의 2 차원적인 속도 장에 의한 film 확산의 특성을 가장 잘 나타내고 있어 하단부위로 갈수록 film 너비가 넓어지고 있음을 잘 계산하고 있다.

3) 문제 3 : Water film 의 Bypass

문제 1)에서 형성된 증기 유동장에 water film 이 주입되는 경우 water film 의 모양이 상간 마찰에 의하여 문제 2)에서의 자유낙하문제에서 변하며 경우에 따라 상당한 양의 물이 bypass 하게 된다. 그림 5 는 각 경우에 대한 film 의 모양의 변화를 나타내며 Option 1 의 경우 가장 심하게 증기속도 장에 의하여 변형이 되며 결과로 bypass 가 많다. Option 3 의 3 차원적 momentum flux 를 고려한 경우는 거의 변화가 없음을 알 수 있으며 증기의 속도장이 상대적으로 저항이 작은 상단으로 우회하는 경향을 보이고 있다.

4) 문제 4 : 유로저항효과

고온관을 설치하여 유로 저항을 고려하였을 때 형성되는 유동장은 그림 6 과 같다. 그림에서 보듯이 이러한 효과를 감안하기 위하여는 3 차원적인 momentum flux 의 고려가 필수적임을 알 수 있다. Full momentum flux 를 다루지 않은 경우의 유동장은 비물리적인 결과를 초래하며 고온관 저항의 영향을 과대평가하는 경향이 있다.

4.2 3D 개념문제에 대한 다차원 유동의 검증

본 개념문제는 노심 내에서의 유동장을 단순화 하기 위하여 간단한 기하학적인 구조와 경계조건을 가정하여 그 타당성을 검토하였다. 노심구조는 그림 7 과 같이 5 x 5 총 25 개의 채널 파이프로 구성하고 길이방향으로는 총 9 개의 노드를 구성하여 전체 볼륨수가 총 225 개의 육면체로 구성되어 있으며 아래 가운데 채널에서 flow 경계조건을 주며 양 가장가지 채널 중앙에서 exit 을 구성하였다.

그림 8 과 9 는 full momentum flux option 을 고려하지 않은 경우이다. 둘 다 비슷한 경향을 나타내고 중앙 채널에서의 유동이 다른 채널에 영향을 거의 주지 않고 최상단에서 continuity 를 만족하기 위하여 유동장이 동심원으로 퍼져 출구로 향하는 유동장 임을 알수 있다. 그림 8 와 같이 cross flow 에서 momentum flux 를 고려하지 않았을 때는 하부 노심에서 유동이 거의 정체되어 있음을 볼 수 있다.

그림 10 과 11 는 3D momentum flux option 을 사용한 경우이다. 그림에서 보듯이 상당한 2 차 유동이 형성되고 있으며 Turbulence shear 를 고려한 경우인 그림 11 는 노심하부에 shear force 에 의한 2 차유동이 더 강하게 형성됨을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

계통분석코드에서 원자로 강수관이나 노심의 구조에서 현실적인 유동장을 계산하기 위하여는 3 차원 유동장을 계산이 필수적이며 이를 위하여는 주방향 뿐만 아니라 횡 방향의 momentum flux 도 같이 고려하여야 함을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 점성이나 난류유동에 의하여 발생하는 전단응력도 3 차원 유동에 상당히 영향을 미친다는 것을 알았다. 향후 보완되어야 할 사항으로는 r-θ-z 좌표계에서의 적용과 이상 난류유동의 개발, 그리고 운동량 확산 항을 explicit 로 처리함에 따라 요구되는 수치 해 의 안정성을 위한 새로운 조건 등이 개발 되어야 할 것이다. 또한 일반적이고 사용자 편이를 위한 3 차원 component 의 입력방법 등도 같이 개발되어야 할 사항이다.

6. 참고문헌

[1] Jae W. Spole et al. , TRAC-PF1/MOD2, Volume I Theory Manual, LA-12031-M, Vol.I, NUREG/CR-5673, Los Alamos National Laboratory, July (1993)

[2] D. Bestion “The Physical Closure Law in the CATHARE Code”, Nuclear Science and Design, Vol. 124 , pp 229-245 (1990)

[3] F. Barre and M. Bernard, “The CATHARE code strategy and assessment”, Nuclear Science and Design, Vol. 124, pp 257-284 (1990)

[4] Thermal Hydraulics Group “RELAP5/MOD3 Code Manual Volume 4 : Models and Correlations”, page 3-9, Scientech, Inc. , NUREG/CR-5535 (1998)

[5] The RELAP5-3D Code Development Team, RELAP5-3D Code Manual Volume 1, Code Structure, System Models and Solution Methods, INEEL-EXT-98-00834 Revision 1.1b, July (1999)

[6] M. J. Thurgood, et. al., “COBRA/TRAC – A Thermal-Hydraulic Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems”, NUREG-CR-3046, November (1982)

[7] W.J.Lee, B.D.Chung, J.J.Jeong, and K.S.Ha, “Development of a Multi-Dimensional Realistic Thermal-Hydraulic System Analysis Code, MARS1.3 and Its Verification”, KAERI/TR-1108/98 (1998)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

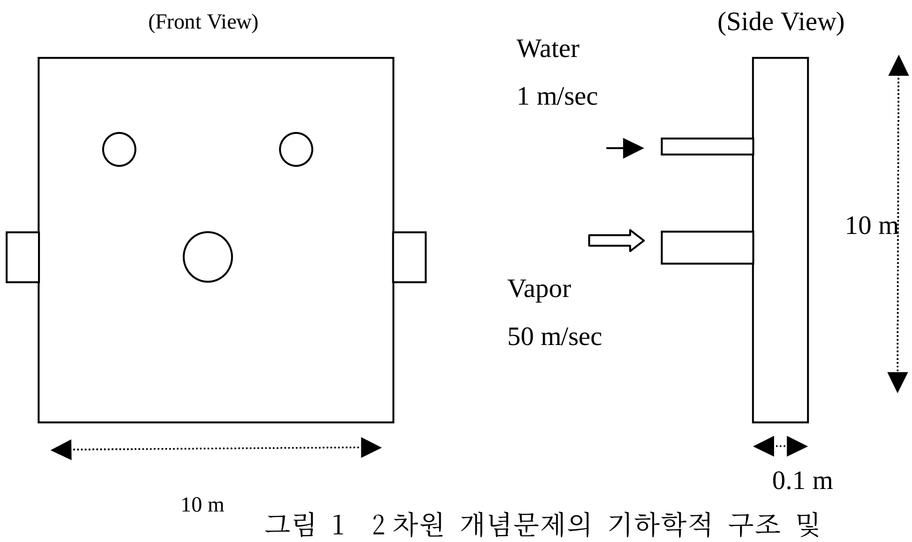


그림 1 2차원 개념문제의 기하학적 구조 및 경계조건

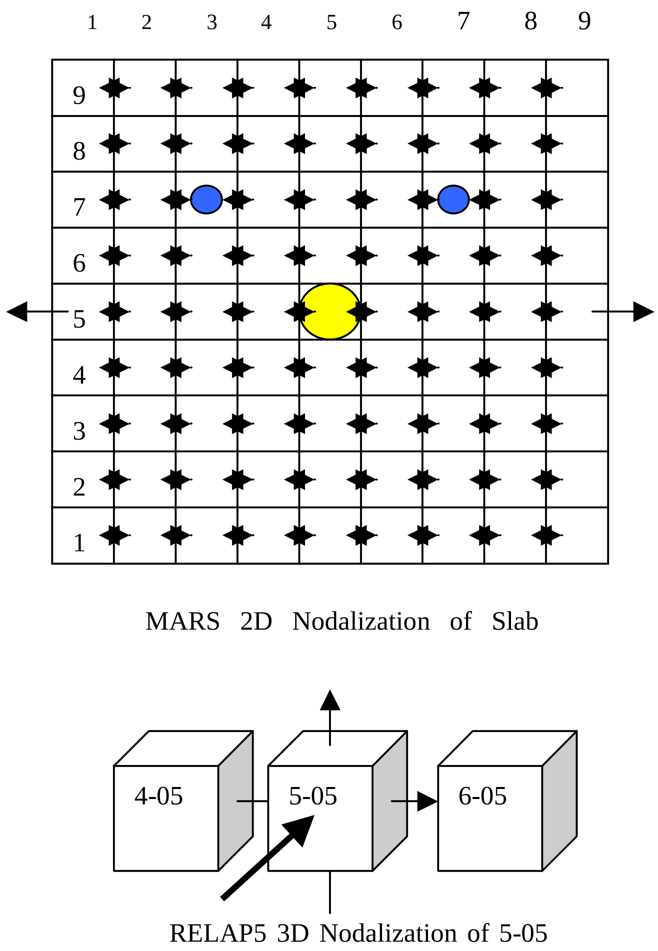


그림 2 개념문제에 대한 MARS 모델링

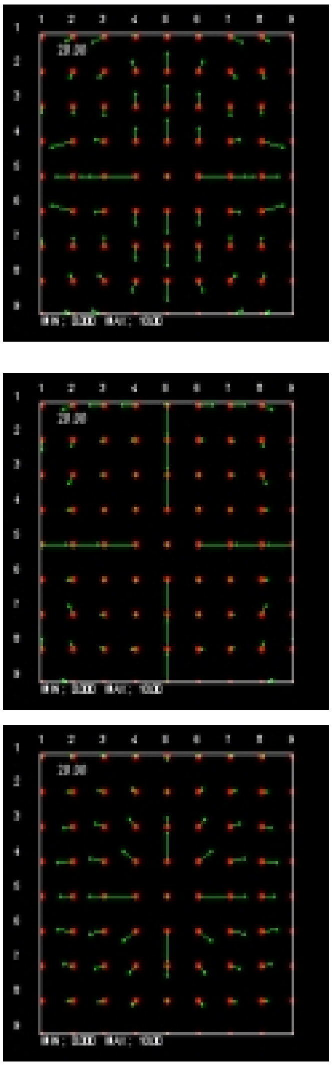


그림 3   50 m/sec 의 증기주입 경우 유동장 계산
(Top; No r-direction momentum flux
Mid; r-z main direction momentum flux
Bottom; full momentum flux)

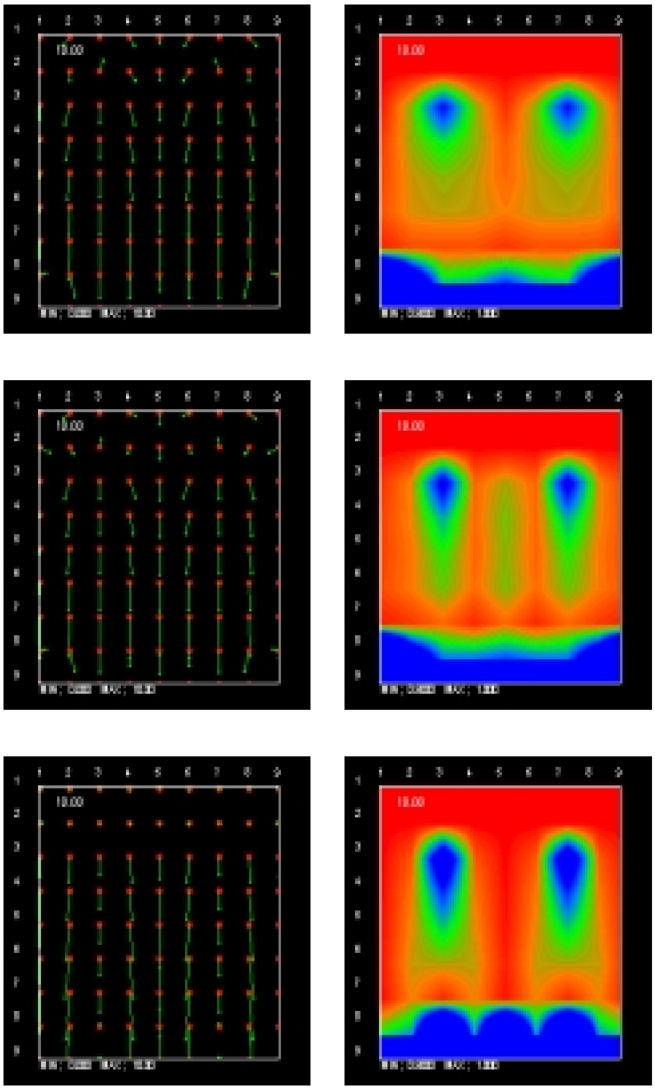


그림 4   1 m/sec 의 안전주입 경우 water film 유동장 계산
(Top; No r-direction momentum flux
Mid; r-z main direction momentum flux
Bottom; full momentum flux)

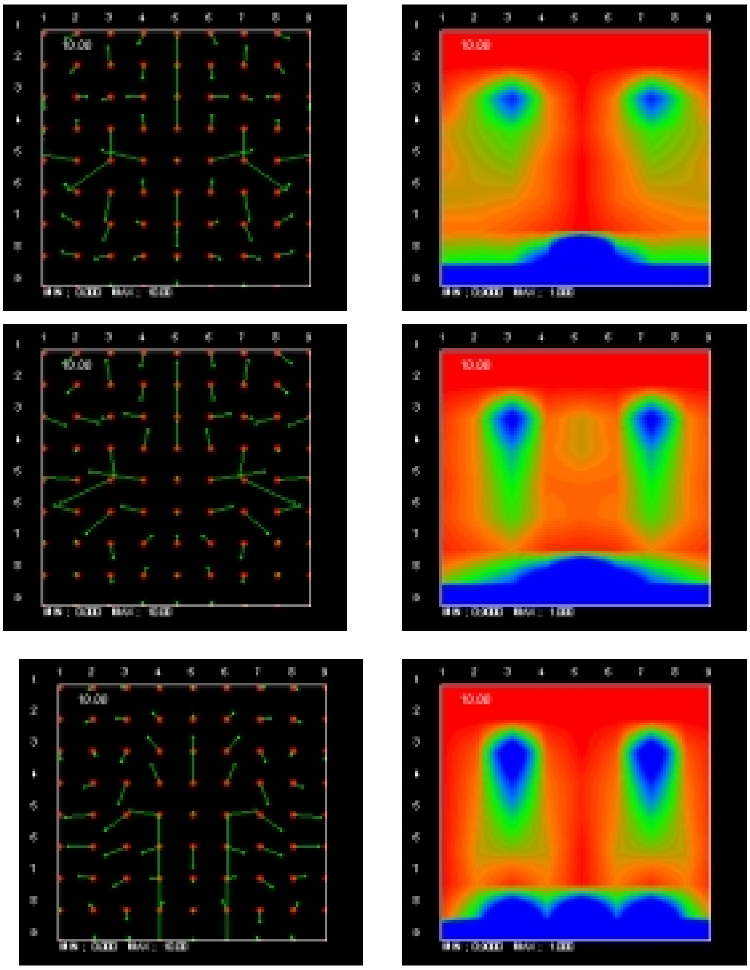


그림 5 증기유동장에서의 water film 유동장 계산
(Top; No r-direction momentum flux
Mid; r-z main direction momentum flux
Bottom; full momentum flux)

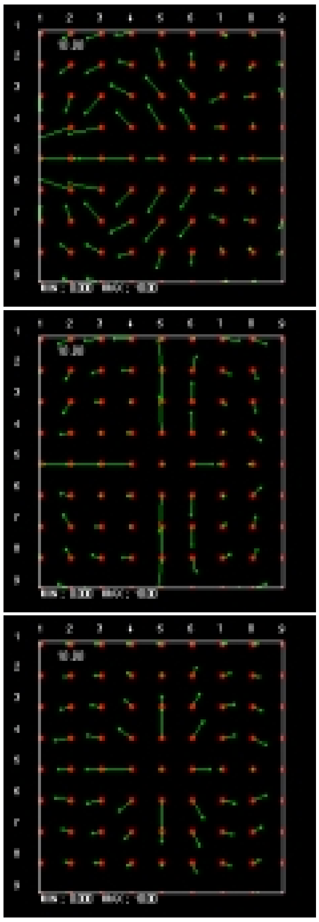


그림 6 Hot leg resistance 가 있는 경우 유동장 계산
(Top; No r-direction momentum flux
Mid; r-z main direction momentum flux
Bottom; full momentum flux)

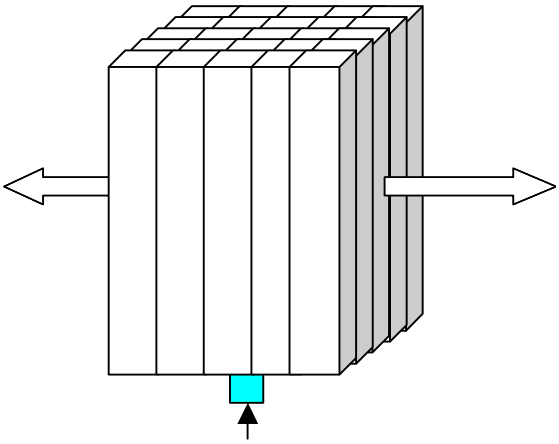


그림 7. 3 차원 노심의 개념문제
(중앙하부 채널로 물이 주입되며 양 가장가지 2 곳으로 빠져나오는 경계조건)

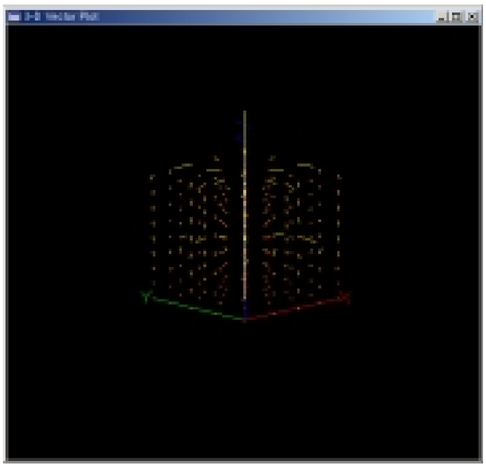


그림 8. main direction 의 momentum flux 를 고려한 유동장

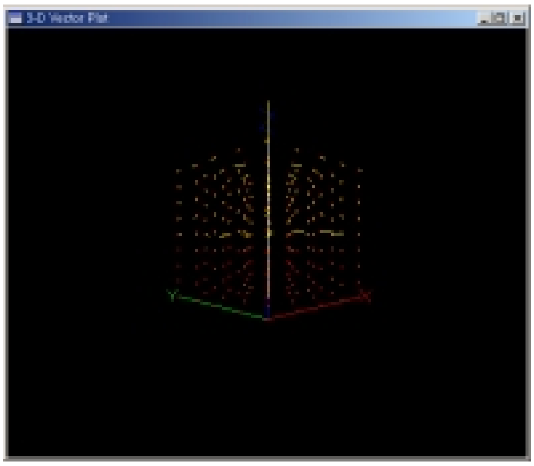


그림 9. cross flow 의 momentum flux 를 고려하지 않았을 때 유동장

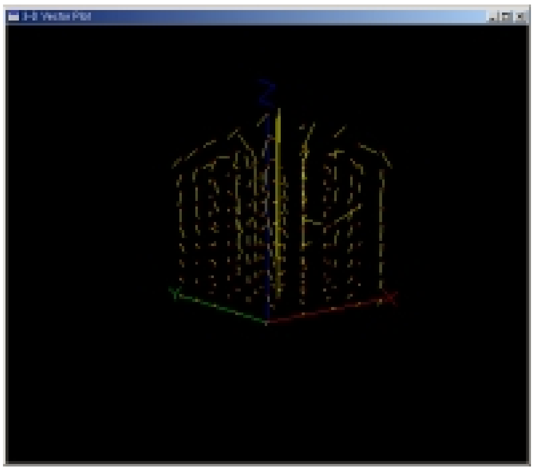


그림 10. 3 차원 full momentum flux term 을 고려한 경우의 유동장

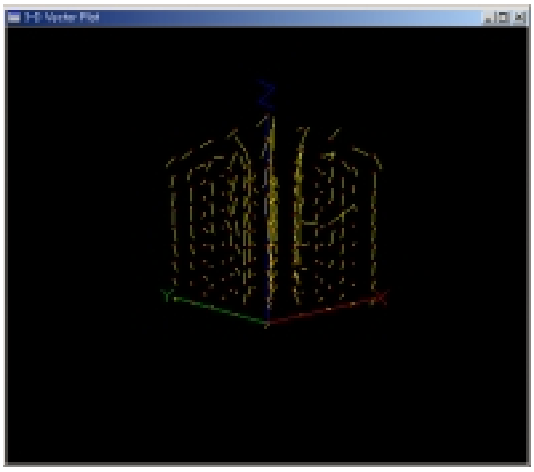


그림 11. 3 차원 full momentum flux 와 turbulence shear 를 고려한 경우의 유동장