2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열수력 계통분석코드MARS의 다차원 컴포넌트, MULTID의 개발

Development of Multidimensional Component, MULTID for Thermal Hydraulic System Analysis Code, MARS

정법동, 배성원, 이영진
한국 원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

열수력계통 분석코드의 다차원 유동해석을 위한 모델개발은 지난 이십년 간 꾸준히 연구되어오고 있는 분야이며 최근 CFD코드를 계통해석에 응용하려는 노력과 더불어 더욱더 활발하게 연구되고 있는 분야이다. MARS코드도 개발초기에서부터 노심의 3차원 분석이 가능한 COBRA-TF을 기반으로 한 3D모듈을 개발하여 사용하고 있으나 전단응력항의 적용이나 원통형 좌표계의 사용에 제약이 있었다. 이러한 제약을 탈피하기 위하여 새로운 component인 “MULTID”를 개발하여 MARS 1D모듈과의 연계를 더욱 향상시키면서 다차원 유동을 해석할 수 있게 하였다. 다차원 유동모델은 porous media에서 적용이 가능한 형태로 개발함으로써 pebble bed 노심이나 유로에 구조물이 복잡하게 있는 일체형 원전의 원자로용기의 다차원 유동해석에 적합하게 하였다. 개발된 MULTID component는 DVI Benchmark 개념 문제에 대하여 계산하고 다차원 유동의 모델검증을 하였다. 향후 다차원 이상유동에의 적용을 위하여서는 이상유동난류모델의 개발과 다차원 유동양상에 대한 모델개발이 필수적으로 수행되어야 할 과제이다.

Abstract

The development of multidimensional flow analysis for thermal hydraulics has been continued during the past 20 years. The recent effort of the utilization of commercial CFD codes in the safety analysis also stimulated the development of two phase multidimensional models. Although MARS code has a 3D module developed from the COBRA-TF model, there were some limitations for the application of shear stress terms and cylindrical coordinate system. A new component “MULTID” has been introduced in order to overcome the limitations of MARS 3D module. The developed MULTID component enables to get the flexible 3D modeling capabilities connected with 1D component modeling in MARS system code. Since two phase multidimensional flow model of MULTID component has been developed for the porous media, it is possible to apply to the pebble bed core and integrated reactor vessel which have many components and complex inside structures. The verification calculations have been performed using benchmark problems for DVI injection. Although the developed multi-dimensional flow model is found to be applicable to two phase flow of simple geometry, the developments of the two phase turbulence model and flow regime model of multidimensional flow would be essential tasks for the future applications in the two phase flow area.

1. 서론

열수력 계통분석 코드의 다차원 유동해석을 위한 모델개발은 크게 다음 두 가지 접근방법이 시도 되고있다. 기기해석에 사용하고 있던 상용 CFD코드를 계통분석 코드에 직접 접목시켜 사용하는 방향과 이상 유동다차원 코드를 개발하여 기존코드를 향상시키는 방향이 주종을 이룬다. 두 방향 모두 원자로 계통을 3차원적으로 해석하여 좀더 자세하게 안전해석을 수행하려는 목적을 갖고 있으며, 단상유동의 난류유동모델을 이상유동까지 확장하여 적용하려는 시도도 하고 있다. 미국 NRC가 주도하고 있는 TRACE코드[1]는 1980년대 초 이미 개발된 TRAC-PF1의 Vessel Component의 사용으로 3차원 유동분석이 가능한 코드이다. 미국 INEEL에서는 이와 같은 USNRC의 코드 개발과 독립적으로 DOE의 후원 하에 기존의 RELAP5/MOD3를 더욱 발전시켜 1990년대 중반에 LBLOCA 분석능력과 3차원 열수력분석모듈을 갖춘 RELAP5-3D[2]를 개발하여 범용코드로 사용하고 있다. 프랑스에서 개발 중인 CATHARE 코드[3]도 3차원 열수력 모듈을 구비하고 있으며 부분적으로 난류유동을 모사할 수 있는 능력이 있다. 독일에서 개발 중인 ATHLET 코드[4]에는 최근 다차원 열수력해석을 위한 2D/3D FLUBOX 모듈이 개발되어 있으며 이들의 성능평가를 위하여 UPTF 실험의 다차원해석을 진행하고 있다. 이와 같은 자체적인 다차원 열수력 모델개발의 노력과 더불어 FLUENT나 CFX와 같은 기존의 상용 전산코드를 연계하여 다차원 해석을 수행하는 시도도 하고 있으나 아직 이상유동의 적용에는 많은 난관이 있는 실정이다.

국내에서는 이상유동의 다차원 해석을 위하여 MARS코드[5] 개발 초기에서부터 3차원 해석이 가능한 COBRA-TF[6]모듈을 근간으로 3D모듈을 개발 한 바 있다. COBRA-TF의 모델에 근간을 둔 MARS 3D 모듈은 액적장 모델이 있는 3유체 이상유동 모델로서 LOCA시 노심에서의 그리드와 액적과의 상호작용 등의 열수력 모델이 FLECHT실험에 의하여 잘 증명되어 있는 우수한 노심 열수력 모델이 있으며, 노심 모델시 채널분리(channel splitting)가 가능하여 열유동 특성에 따라 노심의 노딩을 자유스럽게 할 수 있는 등 여러가지 장점이 있다. 그러나 동시에 이러한 특징으로 인한 제약도 따라서 원통형 좌표계가 필요한 원형 수조에서의 다차원적인 유동이나 노심채널 간의 난류혼합이 아닌 난류유동모델 적용에는 코드 구조상 많은 무리가 있음을 알았다.

본 논문에서는 이러한 제약을 탈피하기 위하여 RELAP5-3D코드[7]나 CATHARE코드에서 수행한 바와 유사하게 MARS코드의 일차원 모듈을 확장하여 다차원 유동에 적용할 수 있게 한 내용을 담고 있다. 이러한 개발의 주 목적은 MARS코드사용자가 계통모델 시 PUMP, VALVE 등 필요에 따라 각 요소를 선택하여 모델 하듯이 다차원 유동계산이 필요한 요소들을 필요에 따라 자유롭게 모델 할 수 있게 하기 위함이다.

2. MULTID Component의 개발

2.1 적용범위의 설정

MULTID component를 개발하기 위한 첫 단계로 개발될 component의 적용범위를 다음과 같이 정의하였다. 다차원 유동계산이 필요한 부분으로는 상용 PWR에서 노심을 포함한 원자로용기 부분과 RWST, PRHR용기와 같은 원자로계통 외의 기기가 있을 수 있으며, 필요하다면 수평 대형관에서의 다차원 분석이 필요하다. 이를 고려하면 적용이 필요한 좌표계는 직각 좌표계, 원통형 좌표계 그리고 구형 좌표계가 있을 수 있다. 이들 중 구형 좌표계는 원자로용기 상부와 하부의 헤드 부분에 국한되며 이는 개략적으로 원통형 좌표계로 나타낼 수 있으므로 적용 좌표계에서 제외시켰다. 또한 수평구조물에서도 적용이 가능하게 component가 임의의 경사각을 갖는 경우에 대하여 사용이 가능하게 하였다.

2.2 노드의 식별체계 규약

MARS코드의 노드입력체계는 볼륨과 junction의 식별규약이 필수적이다. 현재 MARS나 RELAP5 코드에서 사용하는 일반적인 볼륨의 식별자는 9자리 수로 나타내어 CCCNN0000으로 쓰고 있다. 여기서 CCC는 component의 번호, NN은 볼륨의 번호이며 마지막 0000은 나중을 위해 미리 확보하여 놓은 수이다. MULTID component의 볼륨 식별자는 일 차원적인 볼륨 식별자와 동일한 9자리 수를 유지한 상태에서 3차원적인 것이 되어야 하기 때문에 다음과 같이 나타내었다. 즉 CCCXYYZZ0으로 나타내고 CCC는 일 차원 볼륨과 마찬가지로 component의 번호, X는 x 또는 r 방향으로의 볼륨번호, YY는 y 또는 θ 방향으로의 볼륨번호, 그리고 ZZ는 z방향으로의 볼륨번호를 나타내고 마지막 자리 숫자로 0을 사용하면 볼륨자체를, 다른 수를 사용하면 볼륨의 면을 나타낼 수 있게 하였다. x 또는 r방향의 볼륨번호가 한자리수로 다른 방향에 비하여 적게 할당한 것은 원자로 용기의 반경방향으로는 그다지 많은 노드가 필요 없을 것으로 판단하였기 때문이다.

면에 대한 식별자인 마지막 자릿수는 볼륨과 볼륨을 연결할 때 필요하게 되는데, 육면체의 면을 나타내어야 하기 때문에 총 6종의 식별자가 필요하게 된다. 그림 1와 같이 직육면체의 x- 방향의 면을 1, x+ 방향의 면을 2, y-방향은 3, y+ 방향은 4, z-방향은 5,

z+방향은 6으로 나타내었다. 원통형 좌표계에서의 볼륨도 6면을 가지는데 같은 방법으로 r-θ-z 방향의 각 면을 정의하였다. 3차원 component내부에 있는 junction에 대하여도 제각기 고유의 번호를 부여하여야 하는데 볼륨의 식별자와 동일하게 CCCXYYZZF를 부여하고 각 방향에 따라 F의 수를 부여하였다. 즉 x방향인 경우는 F=2, y방향인 경우는 F=4, z방향인 경우는 F=6을 가지게 하여 3개의 번호만을 허용하였다. 볼륨면의 식별자와는 달리 F=1,3,5의 경우는 허용하지 않았는데 이는 junction번호의 중복을 피하기 위함이다.

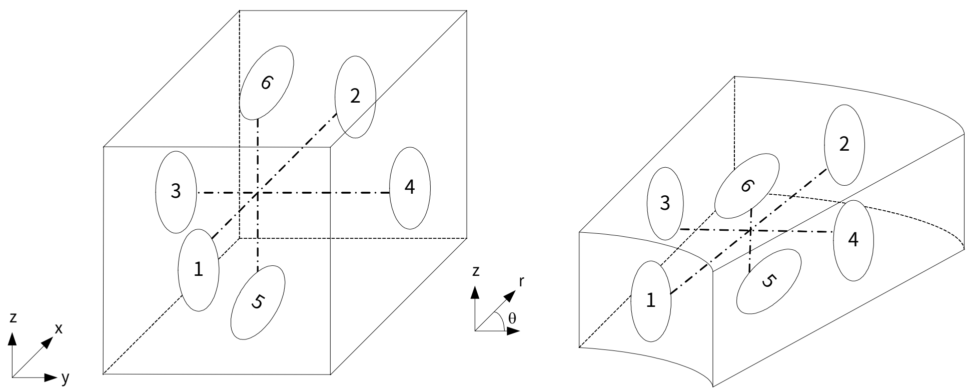


그림 1. 직각 좌표계와 원통형 좌표계에서 3차원 육면체 면에 대한 식별자

2.3 노드의 입력체계 설계

볼륨과 junction의 3차원 입력은 일 차원 노드에 비하여 대단히 복잡하기 때문에 사용자가 쉽게 입력할 수 있는 체계의 설계가 필수적이다. 상용 CFD코드의 경우는 노드가 워낙 많고 사용자의 노딩에 따라 결과가 상당히 틀려지기 때문에 이를 위하여 따로 GUI가 개발하여 사용자 입력을 돕고 있다. MARS MULTID Component의 경우는 대략 1000개 이내의 노드를 다루며 기하학적인 구조도 간단한 것에 국한하기 때문에 상용 CFD의 입력체계보다는 간단히 설계할 수 있다. 그러나 간단한 기하학적인 형태로 유추하는 경우도 그 내부 구조물의 복잡성 때문에 볼륨의 porosity와 junction porosity를 입력할 수 있어야 현실적 적용이 가능하게 한다.

이러한 이유로 다차원 유동방정식을 구성할 때부터 porous media에서 적용이 가능하게 하였으며 사용자가 각 볼륨과 junction에 대하여 porosity를 입력할 수 있도록 하였다. 그림 2와 같은 노심구조에서의 노드는 volume porosity를 전체 노드의 볼륨에서 핵연료봉이 차지하고 있는 체적비율을 제외한 것으로 정의하며 junction porosity는 기하학적인 단면적에서 핵연료봉이 차지하고 있는 단면적비율을 제외한 것으로 정의한다. 이러한 개념은 PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)의 Pebble Bed[8]형의 노심에 대해서도 쉽게 적용할

수 있는 장점이 있다. 그림 3과 같이 유로면적이 변화하거나 내부 구조물이 있는 강수관에서도 같은 개념으로 volume과 junction porosity를 정의하고 입력을 할 수 있게 하였다.

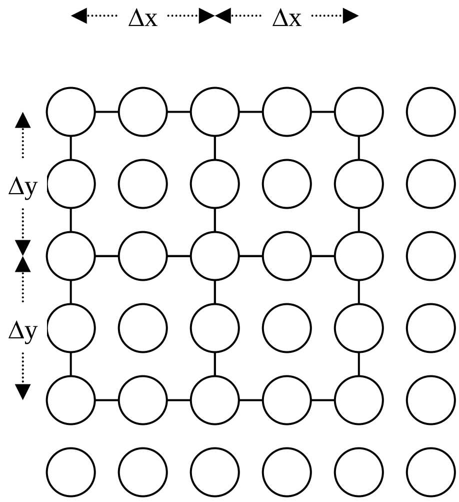


그림 2. 노심에서의 노드와 volume/junction의 porosity

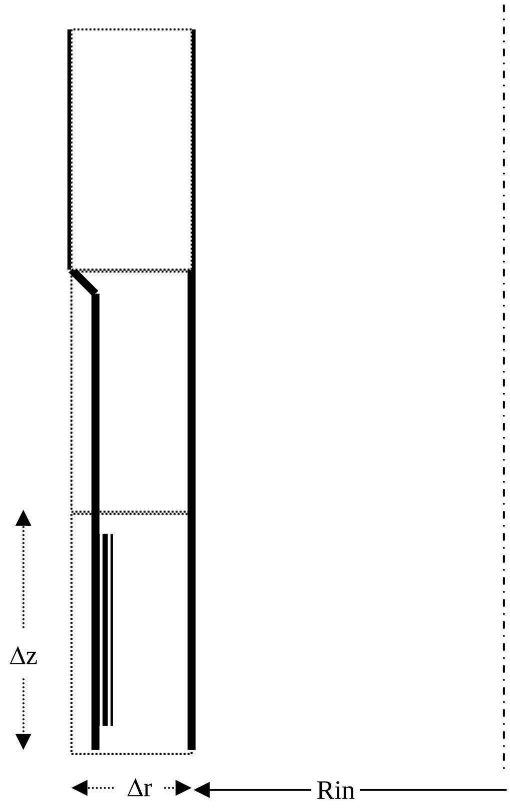


그림 3. 강수관에서의 노드와 volume/junction의 porosity

MULTID component는 x방향의 노드 수 nx, y 방향의 노드 수 ny, z 방향의 노드 수 nz 가

지정되면 자동으로 component내의 전체 볼륨의 개수는 nx*ny*nz로 결정된다. 내부의 junction수는 좌표계에서 따라 틀려지는데 직각 좌표계에서는 (nx-1)*ny*nz+nx*(ny-1)*nz+ nx*ny*(nz-1)개 이며, 원통형 좌표계에서 원주방향으로 폐쇄되지 않았을 경우는 직각 좌표계에서와 동일하나 원주방향으로 완전히 360° 로 폐쇄된 경우는 junction수가 추가되어 전체가 (nx-1)*ny*nz+nx*(ny-1)*nz+nx*ny*(nz-1)+nx*nz가 된다. 어떠한 경우도 내부의 junction수는 3차원적인 방향성을 고려하여야 하므로 볼륨 수보다 약 3배 정도를 할당하여야 한다. 그러나 통상적으로 MULTID component로 원자로 용기 등을 모델하고 노심과 강수관의 벽을 모델하는 경우가 많으므로 이런 경우 내부에 불 필요한 junction이 존재한다. 필요없는 junction을 위해 계산과 메모리를 낭비할 이유가 없으므로 junction을 사용자가 정의를 하여 사용하게 하였다. MULTID 내부의 각 볼륨과 junction에 대한 초기조건과 수력학적 직경 등의 열수력학적 입력자료는 일차원 component와 마찬가지로 사용자가 지정하여야 하는데 입력의 편의를 위하여 3차원적 interval을 지정하고 그 이내에 해당되는 모든 노드에 사용자가 지정한 값이 할당되도록 하였다.

MULTID component는 수직구조 뿐 아니라 중수로의 카란드리아 탱크나 대형 수평관과 같은 수평 구조에 대하여도 적용이 가능하게 사용자 입력으로 경사각을 입력할 수 있게 하였다. 즉 component z축을 기준으로 회전각을 θ_1, component 의 x축의 기준으로 회전각을 θ_2 , z축이 수평면과 이루는 각도를 θ_3로 정의하여 사용자가 MULTID component의 공간적인 배치를 지정할 수 있게 하였다. 정적인 문제를 다루기 위하여는 θ_1 과 θ_2의 각을 지정할 필요가 없기 때문에 여기에서는 오직 θ_3 만 유효한 입력으로 하였으며 나머지 두 입력은 나중의 사용을 위하여 입력설계만 하였다.

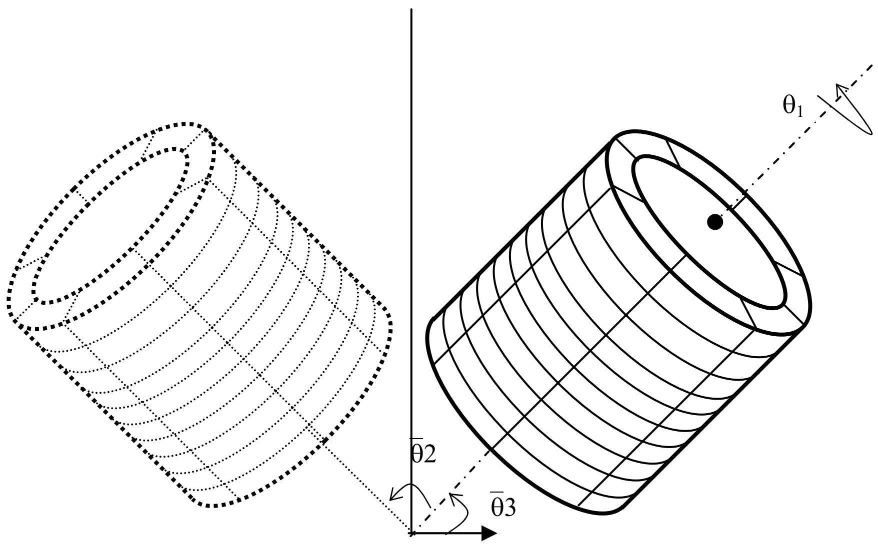


그림 4. MULTID Component의 3차원적인 경사도의 입력에 대한 공간적인 위치변화

2.4 MULTID component와 일차원 component의 연결

MULTID Component와 일차원 component의 연결에는 어떠한 제약도 따르지 않고 사용자에 따라 SNGLJUN, BRANCH, PUMP등의 일차원적인 component와 MULTID component 임의의 위치의 노드면과 연결할 수 있게 하였다. 그러나 각 좌표계에서 연결되는 볼륨면에 대한 규약을 따라 그 면의 수직방향으로 연결이 된다. MULTID component와 MULTID component의 직접 연결은 SNGLJUN이나 MTPLJUN을 통하여 가능하나 이 경우 연결 junction을 통하여 들어오는 momentum flux는 일차원적인 것으로 되며 측면으로 오는 momentum flux는 감안할 수 없게 된다. 그림 5는 가능한 연결방법을 도식한 것으로 사용자가 필요에 따라 multidimensional component를 편리하게 모델 할 수 있다. 따라서 일체형 원자로와 같이 원자로 용기내에 기기들이 있는 경우에도 다차원 모델이 가능하게 하였다.

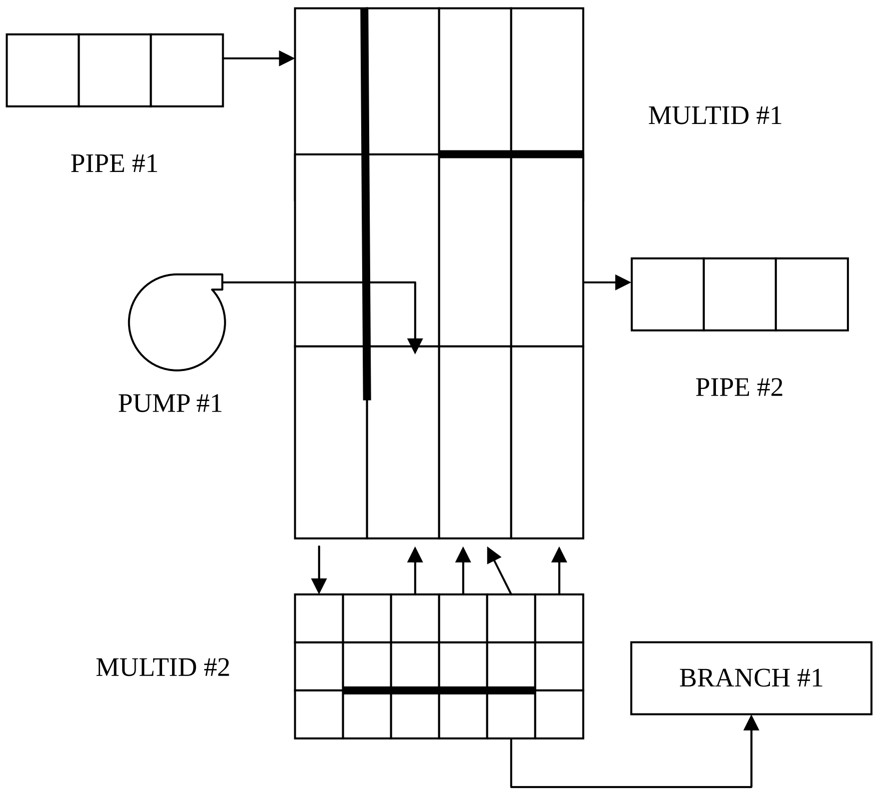


그림 5. MULTID Component와 일차원 Component의 다양한 연결방법

3. 다차원 해석을 위한 Porous Media에서의 유동장방정식 유도 및 코드 적용

MULTID component를 위한 유동장 방정식은 그림 6과 같은 porous media를 고려하여 volume porosity γ_v 와 junction porosity γ_s 를 정의하고 운동량 방정식을 정리하면 다음식과 같다[9].

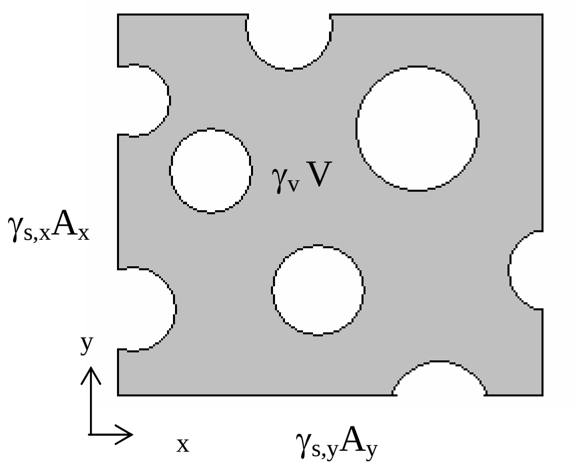


그림 6. Porous Media에서의 control volume

<u>액체의 운동량방정식</u>

$$\gamma_v \frac{\partial}{\partial t}\alpha_g \rho_g \underline{v}_g + \nabla\left(\gamma_s \alpha_g \rho_g \underline{v}_g \underline{v}_g\right) + \gamma_v \nabla \cdot \alpha_g P = \gamma_v \alpha_g \rho_g \underline{g} + \nabla\left(\gamma_s \underline{\underline{\tau}}\right) - \gamma_v F_{ig} - \gamma_v F_{wg} \quad (1)$$

<u>기체의 운동량 방정식</u>

$$\gamma_v \frac{\partial}{\partial t}\alpha_f \rho_f \underline{v}_f + \nabla\left(\gamma_s \alpha_f \rho_f \underline{v}_f \underline{v}_f\right) + \gamma_v \nabla \cdot \alpha_f P = \gamma_v \alpha_f \rho_f \underline{g} + \nabla\left(\gamma_s \underline{\underline{\tau}}\right) - \gamma_v F_{if} - \gamma_v F_{wf} \quad (2)$$

위의 운동량 방정식이 일차원 운동량 방정식과 틀린 점은 3차원적인 대류항인 $\nabla(\gamma_s \alpha \rho \underline{v}\underline{v})$ 항과 전단응력 항인 $\nabla(\gamma_s \underline{\underline{\tau}})$ 항이 추가되어 있으며 볼륨 porosity와 junction porosity가 정의되어 있는 점이다. 본 식을 직각 좌표계와 원통형 좌표계에서 유한 차분식으로 나타내고 대류항과 전단응력 항은 각각 적용의 편이를 위하여 explicit하게 처리하였다. 유도된 유한 차분 항을 MARS코드의 VEXPLT 부 프로그램에 적용하여 각 좌표계의 MULTID component에서 다차원적인 대류와 전단응력으로 인한 확산을 고려할 수 있게 하였다.

4. MULTID Component의 다차원 유동 검증해석

개발된 MULTID component의 적용성을 확인하기 위하여 그림 7과 같은 DVI 검증을 위하여 마련된 benchmark문제[10]에 대하여 유동장 계산을 수행하였다

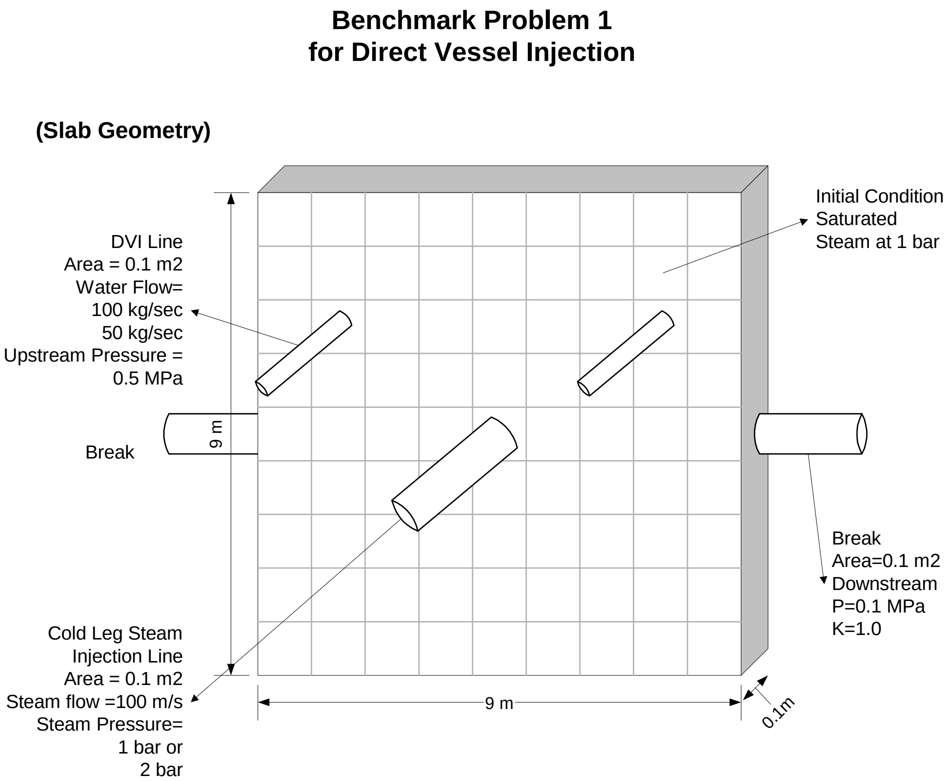


그림 7. MULTID component검증을 위한 Benchmark문제

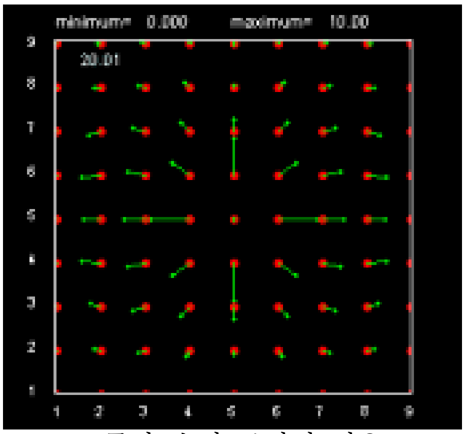
Benchmark문제에 대하여 MARS로 모델링하기 위하여 스래브 부분을 1x9x9노드를 갖는 MULTID component로 모사하고 나머지는 경계조건으로 물이나 증기의 주입으로는 TMDPJUN으로 출구로는 SNGLJUN으로 모델 하였다. MULTID component(번호100)로 모델한 입력은 다음과 같다.

```
1010000   core   multid
*        nx  ny  nz  vflag geom rin  flag
1010001   1   9   9   1     0    0.0  0
1010002   0.0  0.0  90.0
*
* mesh interval data / dr, dtheta, dz
1010101   0.1  1
1010201   1.0  9
1010301   1.0  9
*
* volume option
1011001   1   1   1   9   1   9  1.0  0   0   0  000
* volume friction
```

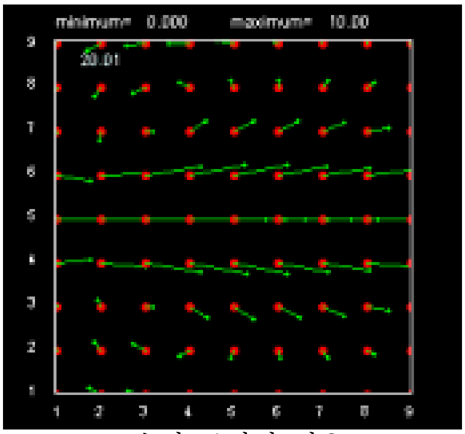
```
1012001   1   1   1   9   1   9
+        0.1e-6  1.0  0.1e-6  0.1  0.1e-6  0.1   1.0  1.0  1.0  1.0  1.0  1.0
*
* junction data                    af,  kf,  kr, flg, dj,  velf,velg
1013001   1   1   1   9   1    9  x  1.0 0.0  0.0  000  0.1  0.0  0.0
1013002   1   1   1   9   1    9  y  1.0 0.0  0.0  000  0.1  0.0  0.0
1013003   1   1   1   9   1    9  z  1.0 0.0  0.0  000  0.1  0.0  0.0
*
* volume initial condition
*
1016001   1   1   1   9   1   9  003  1.0e+5  1000.0
```

위의 입력에서 보듯이 MULTID component를 이용하여 비교적 간단하게 3차원에 대한 입력을 마련할 수 있음을 알 수 있다. 모델에 대한 검증은 다양한 경계조건을 설정하여 3차원 단상 유동장 계산에 대한 검증과 이상유동에 적용성에 대하여 검증을 하였다.

그림 8은 중앙 수직방향으로 증기를 100m/sec로 주입한 경우와 가장자리에서 수평방향으로 같은 속도로 주입한 경우의 비교이다. 결과에서 보듯이 수직방향의 속도가 동심원 형태로 확산되고 양 가장자리의 출구로 유동장이 형성됨을 알 수 있다. 수평방향의 유동일 경우 출구로 곧장 진행하는 것이 주 유동이지만 나머지 부분에서도 이차적인 순환 유동장이 형성되고 있음을 알 수 있다. 이차 순환 유동장 형성에 대하여 좀더 알기 위하여 수평 출입구의 위치를 가장 높은 노드에 설치하고 같은 계산을 하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보듯이 전단응력을 고려한 경우는 이차 유동장이 더 활발하게 형성되는 것을 알 수 있다. 그림 10은 이상유동시 유동장의 형성을 알기 위해 계산한 결과이다. 수직 상단에서 안전 주입수가 주입되어 MULTID component에서 박막으로 형성되어 아래로 흐르고 있는 것을 알 수 있다. 또한 액막과 증기간의 계면 마찰력으로 인해 액막과 가까운 부위의 증기는 아래로 흐르고 그 양쪽에서 순환류가 형성되고 있음을 알 수 있다. 위의 일련의 검증계산을 통하여 개발된 MULTID component와 다차원 유동장 모델의 적용이 원만히 이루어졌으며 이상유동장의 다차원 해석에 이용될 수 있음을 알 수 있다.

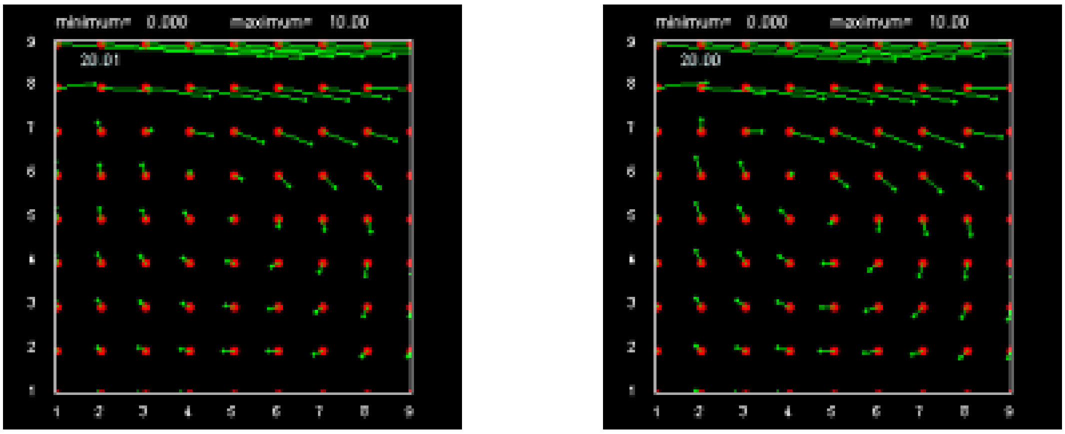


(중앙 수직 주입인 경우)



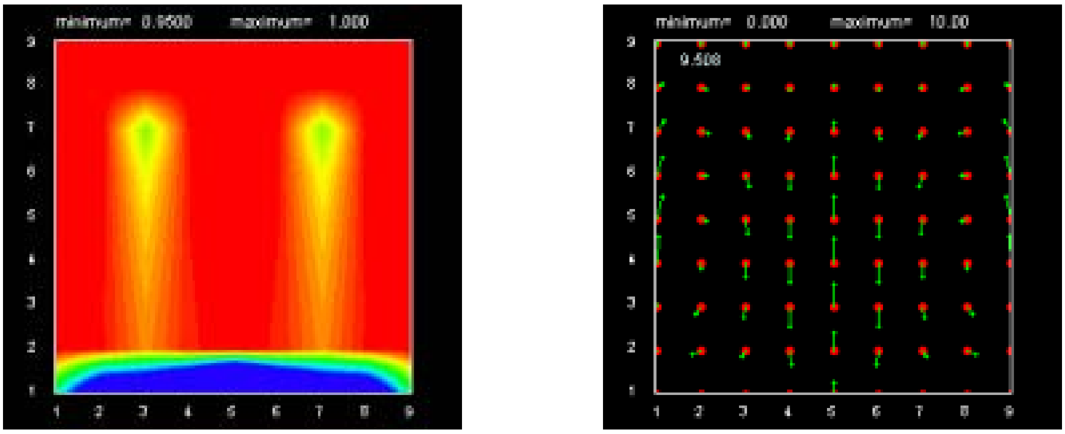
(수평 주입인 경우)

그림 8. MULTID component의 단상유동시 유동방향성에 대한 검증계산 결과



(전단응력항을 고려하지 않은 경우) (전단응력항을 고려한 경우)

그림 9. MULTID component의 단상유동시 전단응력에 의한 유동장 형성 검증계산 결과



(주입수의 공간적 분포: Min:0.95 ~Max:1.0) (증기의 유동장 분포)

그림 10. MULTID component의 이상유동시 계면력에 의한 유동형성 검증계산 결과

5. 결론 및 향후 연구 방향

MARS코드가 현재 가지고 있는 3D 열수력 모듈의 제약성을 탈피하고 사용자의 다양한 다차원 해석의 편이를 위하여 새로운 다차원 열수력 해석 component인 MULTID를 개발하였다. MULTID component는 기존의 일차원 component와의 일관성을 유지하면서 개발되었기 때문에 MARS 일차원 모듈과 쉽게 연결하여 시스템을 모델 할 수 있을 뿐 아니라 시스템을 구성하는 기기의 기하학적 구조에 따라 직각 좌표계와 원통형 좌표계를 사용하여 모델 할 수 있기

때문에 다차원 해석에 유용하게 사용할 수 있다. 또한 열수력 모델의 적용시 porous media에 대하여 적용이 가능하게 설계하였기 때문에 pebble bed형태의 노심의 다차원 해석에도 쉽게 적용이 가능하다는 장점도 있다.

현재 MARS의 MULTID component는 수직 및 수평의 직각좌표계와 수직 원통형좌표계에서 적용이 가능하게 설계되었다. 그러나 향후 기울기가 있는 수평관에 대한 다차원 이상유동에 응용하기 위하여 원통형 관이 임의의 각을 이룰 때의 경우에 대하여 확장이 필요하며 안전주입수의 주입 각도 등을 고려하기 위하여 일차원 component와의 연결시 연결각도에 대한 모델도 필요하다. 열수력 모델에 대한 연구로는 현재 일차원적인 관류에 대하여 유동양상 모델을 탈피하여 다차원 유동양식에 맞는 유동양상으로 확장하는 것이 앞으로 수행하여야 할 어려운 과제이며 좀더 정확한 다차원 유동장의 계산을 위하여 이상난류유동모델의 개발도 중요하다고 볼 수 있다.

6. 참고문헌

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

[2] 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)

[3] Bestion, D., The physical closure laws in the CATHARE code, Nucl. Engrg. Des. 124, pp. 229-245 (1990).

[4] Teschendorff, V., Augstregesilo, H. and Lerchl, G., Methodology, Status and Plans for Development and Assessment of the Code ATHLET, GRS, OECD/CSNI Workshop on Transient Thermal-Hydraulic & Neutronic Codes Requirements, 5-8 November (1996)

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

[6] Thurgood, M. J., Kelly, J. M., Guidotti, T. E., Kohrt, R. J., Crowell, K. R., 1983. “COBRA/TRAC – A Thermal Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems,” NUREG/CR- 3046.

[7] Richard R. Schultz, Richard A. Riemke, Cliff B. Davis, Greg Nurnberg, “A Comparison of the Momentum Equations in RELAP5-3D and Fluent”, 2003 International RELAP5 Users Seminar,ld August 27-29th in West Yellowstone, Montana (2003)

[8] “A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems”, Issed by the USDOE Nuclear Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, December (2002)

[9] A. Hotta, et.al., “ Three dimensional evaluation of two-phase flow in BWR fuel bundles based on compressible two fluid-one pressure and k-e turbulence models”, Ann. Nucl. Energy, vol.**25**, No.7,

pp437-463 (1998.)
[10] 이은철 외 “차세대원자로기술개발 (III) – 핵심기술연구, LOCA코드비교검증 및 평가”, Vol. 2.10, 한국전력공사 전력연구원 (2001)

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.