

CUPID 코드를 활용한 2×2 봉다발 부수로 유동 해석

이재룡,^{*1} 박익규,¹ 김정우²

¹한국원자력연구원, 열수력안전연구부

²서울과학기술대학교, 기계시스템디자인공학과

ASSESSMENT OF THE CUPID CODE APPLICABILITY TO SUBCHANNEL FLOW IN 2×2 ROD BUNDLE

J.R. Lee,^{*1} I.K. Park¹ and J. Kim²

¹Thermal Hydraulics Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

²Dept. of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology

The CUPID code is a transient, three-dimensional, two-fluid, thermal-hydraulic code designed for a component-scale analysis of nuclear reactor components. The primary objective of this study is to assess the applicability of CUPID to single-phase turbulent flow analyses of 2×2 rod bundle subchannel. The bulk velocity at the inlet varies from 1.0 m/s up to 2.0 m/s which is equivalent to the fully turbulent flow with the range of $Re=12,500$ to $25,000$. Adiabatic single-phase flow is assumed. The velocity profile at the exit region is quantitatively compared with both experimental measurement and commercial CFD tool. Three different boundary conditions are simulated and quantitatively compared each other. The calculation results of CUPID code shows a good agreement with the experimental data. It is concluded that the CUPID code has capability to reproduce the turbulent flow behavior for the 2x2 rod bundle geometry.

Key Words : 큐피드 코드(CUPID Code), 봉다발 (Rod bundle), 부수로 (Subchannel)

1. 서 론

원자로 핵연료봉 주위 유동은 복잡한 난류유동을 나타낸다. 지지격자는 원자로 시스템 전체에 압력손실을 가져오는 효과도 있지만, 난류혼합을 증대시켜서 열전달율을 향상시키기도 한다. 이러한 봉다발 주위의 난류유동을 정확히 예측하는 것은 원자로 설계 여유도를 사실적으로 평가하기 위한 필수적인 선행조건이다. 그러므로 봉다발 주위의 난류 유동 특성을 파악하기 위한 연구는 실험 및 계산을 통해 오랫동안 진행되어 왔다.

원자로 성능평가의 관점에서는 평균유동장과 속도 섭동량을 실험적으로 측정하는 연구가 진행되어 왔다. 70 ~ 80년대

에는 피토크관(Pitot tube) 혹은 열선(Hot wire)을 이용한 측정 실험이 수행되었다[1-2].

90년대 이후, PIV(Particle Image Velocimetry) 혹은 LDV(Lase Doppler Velocimetry)를 이용하여 난류 구조를 파악하는 연구가 진행되었다[3-4].

실험연구와 병행하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 측면에서 난류유동을 해석하고 있으며, 일반적으로 단상(single phase)유동을 가정하여, 격자민감도 및 다양한 난류모델의 영향을 평가하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 수치해석을 통한 봉다발 유동해석은 크게 두 분야로 나뉘어져서 연구가 진행되고 있다. 우선 지지격자를 포함하지 않는 봉다발에 대한 연구방향이다. 지지격자를 포함하지 않는 봉다발인 경우에는 상대적으로 적은 수의 격자 생성이 가능하다. 그러므로 단상 난류유동 뿐 아니라 2상 유동 해석까지 확장하는 연구가 진행되고 있다. Hayashi et al.[5]은 정렬 배열 형태의 2×2 혹은 4×4 봉다발 형상에 대해서 단상 및 2상 유동까지 해석을 수행하였다. 그러나 실제 원자로 핵연료봉

Received: November 7, 2016, Revised: December 21, 2016,

Accepted: December 21, 2016.

* Corresponding author, E-mail: jrlee@kaeri.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.4.071

© KSCFE 2016

다발은 지지격자를 포함하고 있다. 압력강하 및 난류혼합을 보다 정확하게 예측하기 위해 지지격자를 포함하는 수치해석적 연구가 시도되고 있다. 지지격자를 구현하기 위해서는 매우 많은 수의 격자수가 필요하다. 그러므로 대부분의 지지격자를 포함하는 봉다발 수치해석은 단상 유동 해석 및 난류 구조 파악에 초점이 맞추어져왔다[6-7]. 또한 난류 혼합에 대한 수치해석 코드의 예측 성능 검증에 대한 국제공동연구도 진행되고 있다[8].

한국원자력연구원에서는 원자로 주요 기기에 대한 2상 유동 가시화를 위한 수치해석 프로그램인 CUPID 코드를 개발해왔다. 원자로 주요 기기의 성능평가[9] 및 안전해석[10]을 위해 단상 및 2상 유동 해석이 수행되어 왔으며, 실험결과와 정량적으로 평가하여 코드의 정확성을 확인하였다. 그러나 주로 복잡한 형상에 대해 다공매질 모델을 적용한 계산이었으며, 자유매질 기반의 CFD 해석에 대한 실험적 연구는 진행되지 않았다. 본 연구에서는 비교적 간단한 2×2 봉다발 부수로 유동분포 실험[11]에 대해 CUPID를 평가하였다. 세 가지 조건의 입구 속도에 대해 표준 k-ε 난류 모델을 적용하여 해석을 수행하였으며, 실험과 비교하였다. 또한 동일한 격자에 대해 상용코드 해석 결과와도 비교하였다. 이를 통해 CUPID 코드의 단상 난류 유동 해석 능력을 평가해보자 한다.

2. 수치해석 기법

2.1 CUPID Code의 개요 및 지배방정식

CUPID 코드는 2상 유동을 해석하기 위해 2유체, 과도, 3유동장 모델을 채택하고 있다. 3개의 유동장(Field)은 연속 액체, 액적 및 증기를 나타낸다. 각 유동장에 대한 질량, 에너지, 운동량 방정식으로 별도로 수립하였으며, 각 유동장의 보존방정식은 계면 질량, 에너지 및 운동량 전달 모델로 서로 연결된다. CUPID 코드의 지배방정식은 자유 매질(Open media)과 다공성 매질(Porous media)에 공통적으로 적용할 수 있도록 수립되어 있는데, 여기에서는 설명의 편의상 개방매질의 지배방정식을 간략히 소개한다.

-k 연속방정식($k = g, l$) :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) = \Omega_k \quad (1)$$

$$\Omega_g = \Gamma_v + \Gamma_{wall} = -\Omega_l \quad (2)$$

-k 운동량 방정식($k = g, l$) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) \\ = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau^{T_k})] + \alpha_k \rho_k \underline{g} + \underline{M}_{ik} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 \underline{M}_{ik} 는 계면 운동량 전달 항이다. 난류 유동을 고려하기 위해서 표준 k-ε 난류 모델을 이용하였다. 따라서 기상과 액상에 대한 에너지 방정식은 각각 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \underline{u}_g) \\ = -P \frac{\partial}{\partial t}(1 - \alpha_g) + E_i^D - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l) \\ + Q_{ig} - Q_{gi} + q_{wg} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[(1 - \alpha_g) \rho_l e_l] + \nabla \cdot [(1 - \alpha_g) \rho_l e_l \underline{u}_l] \\ = -P \frac{\partial}{\partial t}(1 - \alpha_g) + E_l^D - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l) \\ - P \nabla \cdot (\alpha_g \underline{u}_g) + Q_{il} + Q_{gl} + q_{wl} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 E_k^D 는 전도, 난류 에너지 항과 점성 소멸 등의 확산항(Diffusion terms)을 나타낸다. Q_{ig} 와 Q_{il} 는 계면 에너지 전달 항이다. Q_{gl} 은 비응축 기체-액체에서 단위 체적당 열전달율이다.

상기 방정식 이외에 계면 견인력, 계면 열전달과 벽면 비등 모델, 상태 방정식 등이 Mathematical closure를 위해 필요하다. 그러나 본 연구에서는 단상유동 해석을 수행하였으므로, 해당 계면 모델들은 고려되지 않았다. 위의 지배방정식을 풀기 위해 반내재적(Semi-implicit) 수치 기법을 적용하였다[12-13].

3. 2×2 봉다발 격자 생성

3.1 2×2 봉다발 해석을 위한 실험 및 형상모델링

우선 2×2 봉다발 해석을 위한 실험 장치는 Hosokawa[11]을 참조하였다. 실험장치는 0.05 m × 0.05 m × 1.0 m의 수직 직육면체 사각 덕트 내부에 직경 0.02 m인 수직봉 4개로 이루어져 있다. 본 연구에서 검증의 데이터로 활용한 실험은 등온 조건에서 이루어졌으며, 단상 난류 조건에서 실험을 수행하였다. Fig. 1은 실험장치를 나타낸 것이다. 냉각수가 수직 봉다발의 하부에서 주입되며, 상부로 진행하면서 봉다발 주위에서 생성되는 난류유동을 PIV를 사용하여 가시화하였다. 입구 속도는 1.0 ~ 2.0 m/s이며, 이는 레이놀즈 수 12,500 ~ 25,000에 해당한다.

3.2 격자 생성

난류모델은 벽함수 적용여부에 매우 의존적이다. 그러므로 격자 생성 시 벽면근처에서 균일한 격자를 생성하는 것이 중

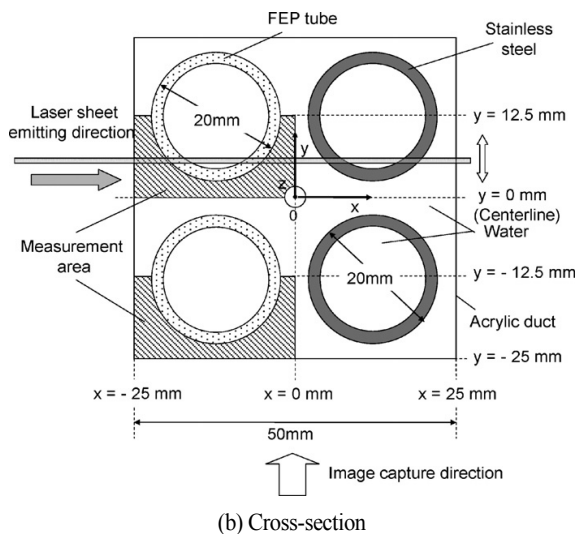
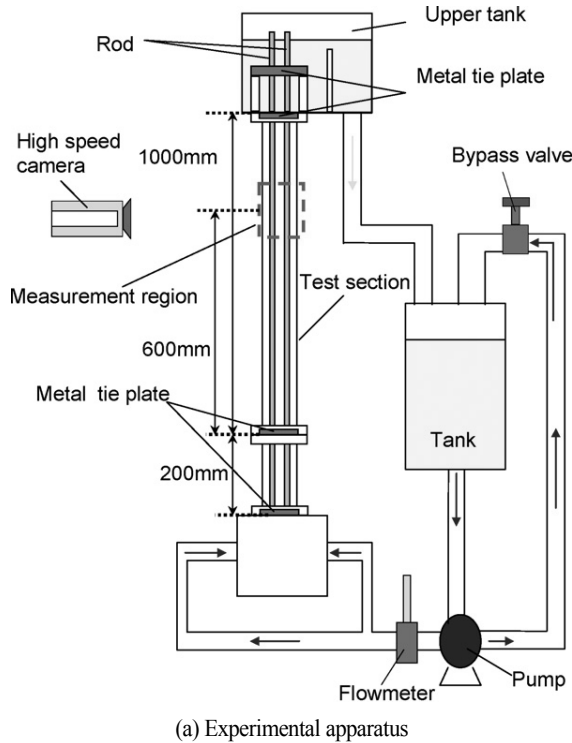


Fig. 1 2x2 rod bundle experiments[9]

요하다. 본 연구에서는 벽면에 정렬격자를 구성한 경우와 구성하지 않은 경우에 대해서 결과를 비교하도록 하였다.

Fig. 2는 비정렬 격자가 생성된 봉다발 부수로 단면을 나타낸 것이다. 격자 생성을 위해서 상용 전처리 프로그램인 GiD를 사용하였다. 벽면 경계층 고려 없이 모든 영역을 비정

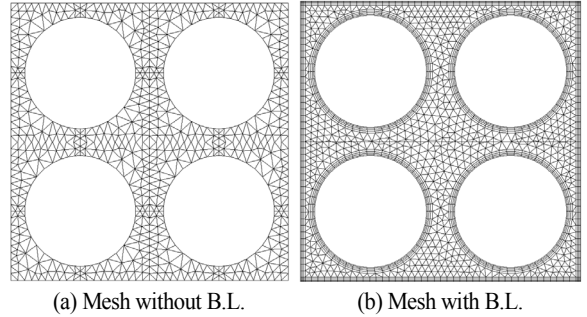


Fig. 2 Mesh generation

렬 격자로 구성된 경우(Fig. 2(a)) 및 벽면 근처에서 경계층 고려를 위한 정렬 격자를 도입한 경우(Fig. 2(b))에 대해 각각 격자를 생성하였다. 축방향으로는 Prism 형태를 격자를 구성하였다. 총 격자수는 약 11만개를 사용하였다. 본 연구에서 수행한 입구 속도에 대해 벽면에서의 y^+ 값은 40 ~ 50 정도를 나타냄을 확인하였다.

CUPID 코드는 영역분할 기반의 병렬계산 기능을 제공하고 있다. 영역분할을 위해서 METIS[14] 라이브러리를 적용, 복잡한 형상에 대한 영역분할을 가능하게 한다. 분할된 부영역 사이의 정보전달은 MPI(Massege Passing Interface) 를 사용한다. 본 계산에서는 10개의 프로세서를 사용하였다.

4. 2x2 봉다발 해석 결과

4.1 CUPID코드 계산 결과

본 계산에서는 세 가지 유속 조건에 대해서 계산을 수행하였다. 즉, 입구에서의 속도 경계조건은 각각 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s으로 설정하였다. Fig. 3 및 Fig. 4는 속도분포를 봉단 위 갭 사이 영역($x/D = 0.0$)과 축방향으로 각 주요 단면 ($z = 0.2$ m, 0.4 m, 0.6 m, 0.84 m)에 대해서 2차원 단면분포를 나타내었다. 입구에서는 균일한 속도 경계조건을 부여하였기 때문에, 유동이 진행됨에 따라 서브채널 중심부에서 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 채널 중심에서 가장 속도가 크고, 봉다발 사이 영역에서는 상대적으로 유속이 작아진다. 본 실험은 무한히 넓은 공간이 아닌 제한된 크기의 사각 채널 내에 봉다발이 존재하는 경우이기 때문에 채널 벽면의 접촉 조건으로 인해서 벽면에서의 유동이 중심부에 비해서 상대적으로 작다.

Fig. 3는 출구 근처 높이($z = 0.84$ m)에서, 단면속도 분포를 나타낸 것이다. 일반적인 봉다발 유동 실험은 유동혼합기 및 지지격자를 포함하는 경우가 많다. 그러나 본 계산에 활용된 실험은 기초적인 실험으로서 봉다발만으로 이루어져있다. 이

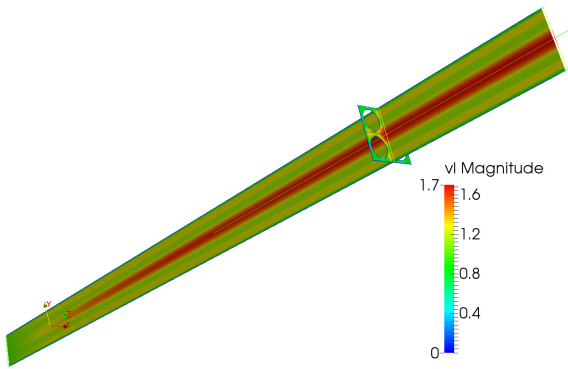


Fig. 3 Velocity distribution along streamwise direction

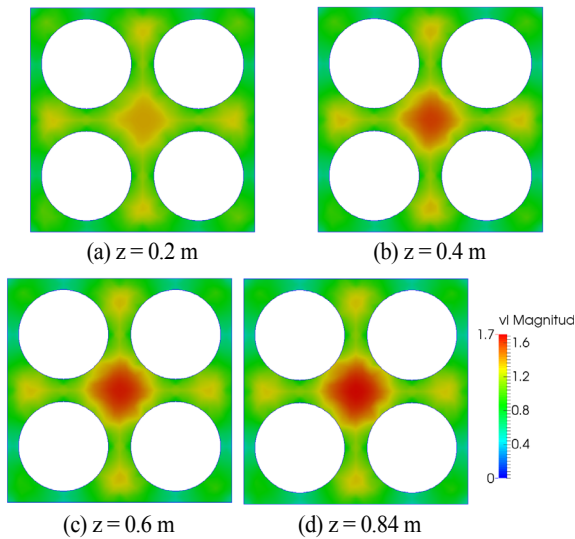
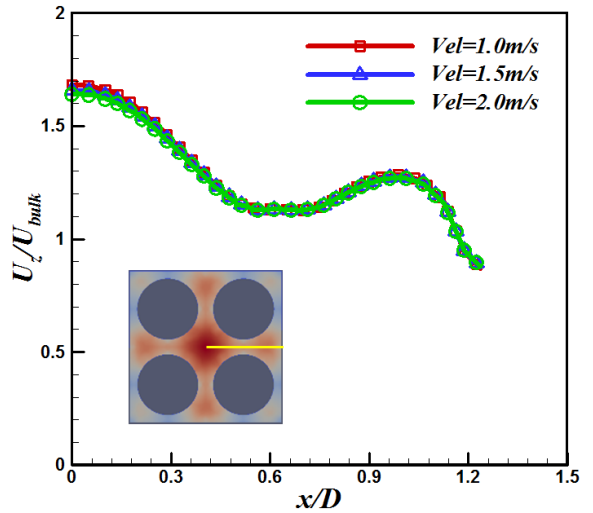


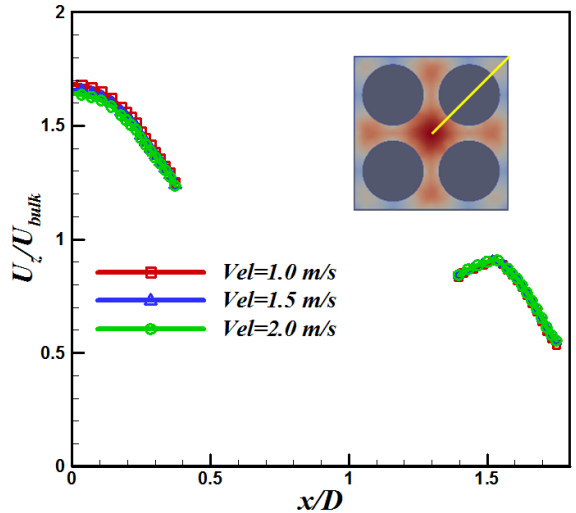
Fig. 4 Velocity distribution in cross-section at different height

린 형상의 경우, 유동분포는 x- 및 y- 방향으로 대칭을 이룬다. Hosokawa[11]에서는 측정결과를 이용하여, 유동의 대칭성을 검증하였다. CUPID 계산에서도 마찬가지로 대칭성을 보장하기 위해 Fig. 2에서 보는바와 같이, 최대한 격자 대칭성으로 확보하고자 하였다. 계산 결과 대칭성이 잘 유지되었으며, 대칭성에 대한 그림은 생략하였다. 또한, 부수로 중심부로부터 대각 방향에 대한 속도 분포를 Fig. 3에 나타내었다.

속도 분포는 각 계산 조건에 대해서 입구속도(U_{bulk})로 무차원화하였다. Fig. 4(b)의 단면분포와 Fig. 5의 속도 분포에서 알 수 있는 바와 같이, 부수로 중심부($x/D = 0.0$)에서 속도가 가장 높게 나타난다. 봉다발 사이의 간격이 가장 좁은 영역으로 갈수록 속도 크기가 작아진다. 그러나 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 벽면쪽 부수로 외곽 부분 ($x/D \sim 1.0$)에서는 유속



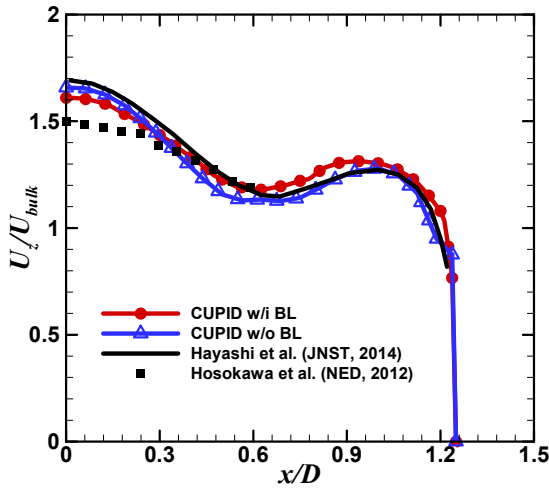
(a) Alongside in between rods at $z = 0.84$ m



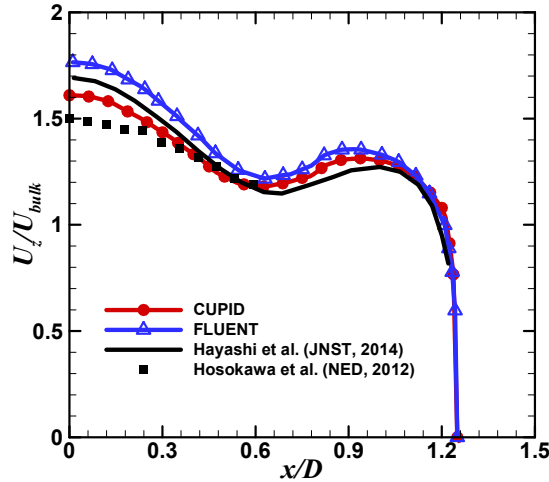
(b) Cross the rod $z = 0.84$ m

Fig. 5 Normalized velocity profile in the subchannel

이 다소 회복된다. 이후, 벽면에서는 점착조건으로 인하여 속도는 거의 없으므로 나타나지 않았다. Fig. 5(a)에서 나타난 외곽부 부수로($x/D \sim 1.0$) 영역에서의 무차원 속도는 1보다 크지만, Fig. 5(b)에서의 최외곽 부수로 영역($x/D \sim 1.5$)에서는 1 이하이다. 즉, 부수로 중심부 및 횡방향 및 수직방향 벽면 부수로 영역에서는 유입 속도에 비해 유동이 발달되지만, 최외곽 코너 부수로 영역에서는 유입속도에 비해서 발달되지 못한다. 세 가지 유속 조건에 대해서 무차원화 된 속도분포는 비슷한 경향을 나타낸다.

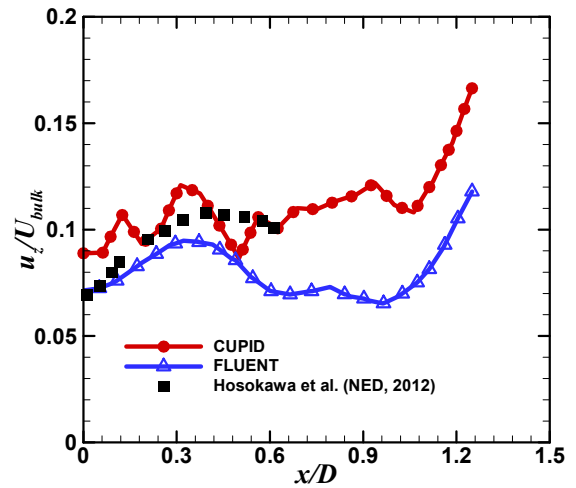


(a) Comparison of with- & without boundary layer mesh

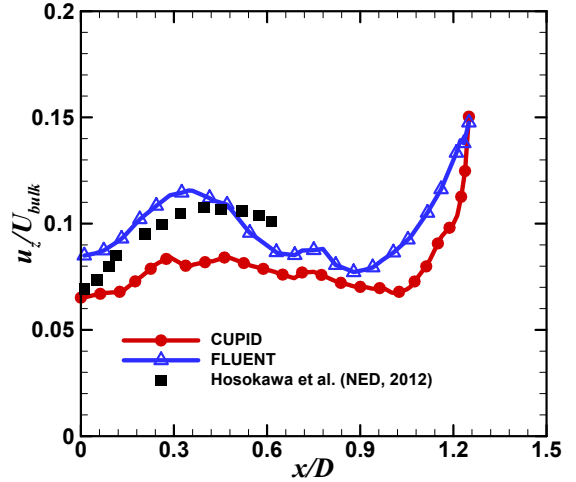


(b) Comparison of CUPID and FLUENT

Fig. 6 Comparison of normalized velocity



(a) Without boundary layer mesh



(b) With boundary layer mesh

Fig. 7 Comparison of turbulent intensity

4.2 계산결과의 정량적 평가

계산 결과의 정량적 비교를 위해서 실험결과[11]와 비교한 것을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서는 벽면 경계층 격자를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 CUPID 계산 결과를 실험과 계산에 대한 Hayashi et al.[5]과 비교하였다. 또한 본 연구에서 수행한 형상에 대해 상용코드와의 비교를 위해 잘 알려진 상용 코드(ANSYS FLUENT)를 적용한 결과를 Fig. 6(b)에 추가하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, CUPID 계산결과가 평균 속도에 대한 실험 측정값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 다만, 부수로 중심부에서의 최대 속도는 실험값에 비해 다소 높게 예측하고 있다. 이러한

패턴은 계산을 수행한 Hayashi et al.[5]과 FLUENT 결과에서도 동일하게 나타나고 있다. 전반적으로 평균 속도 분포는 정량적으로 실험계측을 잘 예측한다고 볼 수 있다. 다만, CUPID 코드와 FLUENT 코드는 표준 k-ε 난류모델을 적용했다는 점에 있어서는 동일하지만, 계산 격자 및 운동량 방정식의 대류항 및 확산항에 대한 이산화 방법이 다르기 때문에 두 코드간의 오차는 발생할 수 있다고 판단된다.

난류 모델 평가를 위해 평균유동장 외에 난류강도를 비교하였다. 벽면에서의 정렬 격자를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 속도 섭동 성분을 Fig. 7에 나타내었다. CUPID 코드는 등방성 난류를 가정하고 있는 RANS(Reynolds-

Averaged Navier-Stokes) 기반이기 때문에 속도 섭동 성분을 직접적으로 계산할 수 없다. 다만, 본 계산은 지지격자가 없는 봉다발 형상이기 때문에 횡방향 속도성분이 축방향 속도 성분에 비해 상대적으로 매우 작다고 가정하였다. 즉,

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2} \right) \quad (6)$$

에서 $u', v' \ll w'$ 라고 볼 수 있다. 그러므로 식 (6)의 난류에너지는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{(w')^2} \quad (7)$$

즉, 난류에너지 (k)는 코드 내에서 계산이 되므로, 속도 섭동 성분을 Fig 7과 같이 나타낼 수 있다. 벽면 경계층이 없는 경우 섭동량이 크게 나타난 것은 난류에너지 (k) 값이 크게 예측되었기 때문이며, 이는 벽면 근처에서 경계층 격자가 없이 비정렬 프리즘 격자가 구성되었기 때문에 불규칙적인 패턴을 보이면서 크게 예측되었기 때문이다. 반면, 경계층 격자를 구성한 경우, 벽면으로부터의 섭동량이 급격한 구배 없이 매끄럽게 분포되는 것을 확인할 수 있다.

상용코드 및 CUPID 해석 결과 모두 실험값의 범위를 정성적으로 잘 예측한다고 볼 수 있다. 지지격자를 포함하는 봉다발 부수로에 대한 난류 유동에 대한 RANS 기반의 수치해석적 연구에서 난류강도를 예측하는 것은 쉽지 않다고 보고된 바 있다[8,15]. 이는 지지격자로 인해 난류가 비등방성 형태를 나타내기 때문인데, 이를 극복하기 위해서 비등방성 난류를 고려할 수 있는 RSM(Reynolds Stress Model) 을 적용하거나, 대용량 격자를 도입하여 대형 와 모사(Large Eddy Simulation) 를 사용한 접근이 이루어지고 있다[7,8]. 본 연구에서 고려된 지지격자가 없는 봉다발 주위의 부수로에 대한 유동은 등방성 난류의 형태를 보인다고 할 수 있다. 그리고 이에 대해서 수치해석을 수행하였기 때문에 Fig. 7에서 보는바와 같이 CUPID 및 상용코드 계산 결과가 실험 결과를 비교적 잘 예측한다고 볼 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는, 2x2 봉다발 주위 유동 실험결과를 이용하여 CUPID 코드의 3차원 단상 난류 유동 해석능력을 평가하였다.

계산은 세 가지 유동 조건에 대해서 수행하였으며, 실험 결과와 정량적으로 비교하였다. 또한, 상용 코드와의 계산 결

과도 추가로 비교하였다. k-ε 난류모델을 적용한 CUPID 계산 결과는 실험 측정값과 매우 잘 일치함을 확인하였다. 즉, CUPID의 난류모델이 타당하게 이산화되어 코드에 적용되고 있음을 알 수 있다. 또한 등방성 난류를 가정한 난류 강도를 비교하였으며, 실험결과와 정성적으로 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

CUPID 코드는 2상 유동 고정밀 해석을 위한 코드이기 때문에 추후 2상 유동 난류모델 평가가 수행되어야 할 것이다. 현 봉다발 실험조건에서 벽면 열유속을 부여하여 2상 유동 조건을 쉽게 생성할 수 있다. 이를 바탕으로 2상 유동 난류 유동을 모의하고, 난류 모델을 정량적으로 평가해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부 및 원자력안전위원회)의 재원으로 한국연구재단 및 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구개발사업 No. 2012M2A8A4025647, 원자력안전연구센터사업 No. 1305011).

References

- [1] 1975, Trupp, A.C. and Azad, R.S., "The structure of turbulence flow in triangular array rod bundles," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.32, pp.47-84.
- [2] 1987, Rehme, K., "The structure of turbulent flow through rod bundles," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.99, pp.141-154.
- [3] 2008, Chang, S.K., Moon, S.K., Paek, W.P. and Choi, Y.D., "Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.238, pp.600-609.
- [4] 2006, Holloway, M.V., Beasley, D.E. and Conner, M.E., "Investigation of swirling flow in rod bundle subchannel using computational fluid dynamics," *Proc. of ICONE-14*, 89068.
- [5] 2014, Hayashi, K., Hosokawa, S. and Tomiyama, A., "Void distribution and bubble motion in bubbly flows in a 4x4 rod bundle, Part II: numerical simulation," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.51, pp.580-589.
- [6] 2014, Cinosi, N., Walker, S.P., Bluck, M.J. and Issa, R., "CFD simulation of turbulent flow in a rod bundle with spacer grids (MATIS-H) using STAR-CCM+," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.279, pp.37-49.
- [7] 2016, Mikuz, B. and Tiselj, I., "Wall-resolved Large Eddy

- Simulation in grid-free 5×5 rod bundle of MATIS-H experiment," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.298, pp.64-77.
- [8] 2014, Lee, J.R., Kim, J. and Song, C.H., "Synthesis of turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids based on the OECD-KAERI CFD benchmark exercise," *Nuclear engineering and design*, Vol.279, pp.3-18.
- [9] 2013, Lee, J.R., Park, S.G., Kim, H.T., Yoon, H.Y. and Jeong, J.J., "Numerical study for CANDU moderator temperature prediction by using the two-phase flow analysis code, CUPID," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.59, pp.139-148.
- [10] 2013, Yoon, H.Y., Jeong, J.J., Cho, H.K., Bang, Y.S. and Seul, K.W., "A multi-scale analysis of the transient behavior of an advanced safety injection tank," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.62, pp.17-25.
- [11] 2012, Hosokawa, S., "Measurements of turbulent flows in a 2×2 rod bundle," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.249, pp.2-13.
- [12] 2012, Yoon, H.Y., Cho, H.K., Lee, J.R., Park, I.K. and Jeong, J.J., "Multi-Scale Thermal Hydraulic Analysis of PWRs using the CUPID Code," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.44, No.8, pp.831-846.
- [13] 2014, Yoon, H.Y., Lee, J.R., Kim, H., Park, I.K., Song, C.H., Cho, H.K. and Jeong, J.J., "Recent Improvements in the CUPID Code for a Multi-Dimensional Two-Phase Flow Analysis of Nuclear Reactor Components," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.46, No.5, pp.655-666.
- [14] 1998, Karypis, G. and Kumar, V., "Multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol.48, No.1, pp.96-129.
- [15] 2007, Mahaffy, J.H., Chung, B., Dubois, F., Ducros, F., Graffard, E., Heitsch, M., Henriksson, M., Komen, E., Moretti, F., Morii, T., Muhlbauer, P., Rohde, U., Scheuerer, M., Smith, B.L., Song, C., Watanabe, T. and Zigh, G., "Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications," *OECD Report*, NEA/CSNI/R(2007)5.