

## 범용 전산유체 코드를 이용한 봉 다발에서의 난류 유동 수치해석

인왕기, 오동석, 전태현, 정연호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

범용 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics) 코드인 CFX-F3D 를 이용하여 봉 다발에서의 난류 유동 수치해석을 수행하였다. 3x3 봉으로 구성된 부수로 사이의 난류 횡류(Crossflow) 혼합유동과 평행한 4 개의 봉으로 이루어진 벽 수로에서의 난류 유동구조를 수치적으로 분석하여 각각의 실험결과와 비교하였다. 부수로 횡류 혼합유동의 경우 예측된 주 유동방향 평균 속도분포는 실험결과와 잘 일치하였으나 벽면과 인접한 부수로에서의 난류강도 분포는 다소 큰 차이가 나타났다. 벽수로의 경우 수로 중심선 근처의 주 유동방향의 속도변화는 크게 예측되었고 벽 전단응력은 유로가 협소해지는 영역에서 낮게 예측되었으나 전반적으로 실험결과와 유사한 유동특성을 나타냈다. 이 연구는 봉 다발에서의 난류 유동구조에 대한 이해를 증진시킴과 더불어 CFX-F3D 코드를 평가함으로써 향후 지지격자와 임계열유속 증진장치가 부착된 복잡한 형상의 핵연료 다발에서의 유동장 수치해석의 기반을 마련하였다

### 1. 개요

원자로에 장전되는 핵연료 다발은 대부분 삼각형 또는 사각형 배열의 연료봉과 냉각수가 흐르는 부수로(Subchannel)로 구성된다. 핵연료 다발에 대한 대부분의 열수력적 분석은 부수로 해석을 통해 이루어지고 있다. 부수로 해석은 제어체적인 부수로내의 속도와 온도분포 등의 미세한 유동구조를 무시하고 부수로의 평균 유량과 유체온도를 계산하는 방식으로 부수로 사이의 난류 혼합은 혼합계수를 사용하여 고려된다. 부수로 사이의 난류에 의한 횡류 혼합은 노심온도 분포를 균일하게 하므로 핵연료 다발의 열수력 성능을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 핵연료 다발의 성능 향상을 위해서는 봉 다발에서의 난류 혼합에 대한 이해가 필수적이다. 핵연료 다발에서의 유동장은 기하학적으로 복잡하고 3 차원 난류 열전달 유동이므로 지금까지는 주로 실험적인 연구<sup>[1-6]</sup>가 수행되었다. 그러나 최근에는 전산유체 해석 기법의 발달과 컴퓨터 성능의 혁신적인 향상을 바탕으로 수치해석 연구<sup>[7-9]</sup>도 시도되고 있다. 수치해석을 통한 핵연료 다발에서의 유동장 분석은 실험적 방법에 비해 소요시간이 짧고 비용도 적게 소요되는 잇점이 있다. 따라서 유동장 수치해석

은 다양한 핵연료 다발 모형에 대한 성능시험을 수행하기전에 각 모형의 유동특성 평가 및 형상 최적화 작업에 유용하며 또한 실험연구를 위한 기초자료를 제공한다.

현재 다수의 범용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 코드들이 유동장 수치해석을 위해 개발되었다. 이들 범용 CFD 코드들은 대부분 Pre-processor, Solver 와 Post-processor 로 구성된다. Pre-processor 는 CAD 개념을 이용하여 기하학적 형상과 전산격자를 생성하고 Solver 에서 유동장 지배 방정식을 유한체적법(또는 유한요소법)으로 차분화(Discretization)시켜 수치해를 구한다. Post-processor 는 유동장 특성 인자들(속도, 압력, 난류 운동에너지, 난류강도 등)을 그림으로 나타내어 유동장 분석을 용이하게 해준다. 현재의 범용 CFD 코드들의 Solver 는 SIMPLE 알고리즘을 기본으로 하고 있으며 대류항의 수치 차분법은 Hybrid, Upwind, QUICK 등 다양하다. 또한 난류모델도  $k-\epsilon$  모델을 비롯하여 3-4 개의 난류모델이 포함되어 있다. 지금까지 개발된 범용 CFD 코드들에 대한 비교평가<sup>9)</sup> 결과 전반적으로 미세한 유동구조를 아직 정확하게 예측하지는 못하는 것으로 나타났다. 또한 전산격자의 구성, 수치 차분법과 유동모델의 선정 및 경계조건의 설정에 따라 예측 결과가 다르게 나타났다. 따라서 유동구조에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 유동장 특성에 적합한 위와 같은 인자들의 설정이 필요하다.

본 연구에서는 복잡한 형상의 핵연료 다발에서의 유동장 분석에 앞서 맨 봉 다발(Bare Rod Bundle)에서의 난류 유동을 범용 CFD 코드를 이용하여 수치적으로 분석하였다. 즉, CFX-F3D<sup>10)</sup>를 이용하여 3x3 봉으로 구성된 부수로 사이의 난류 횡류 혼합유동과 평행한 4 개의 봉으로 이루어진 벽 수로에서의 난류 유동구조를 분석하여 각각의 실험결과와 비교함으로써 봉 다발에서의 난류 유동구조와 CFX-F3D 코드에 대한 이해를 도모하였다.

## 2. 난류 유동 수치해석

### 1) 부수로 횡류 혼합유동

봉 다발 부수로 사이의 횡류 혼합에 대한 이해를 증진시키기 위해 Rowe 등<sup>11)</sup>은 맨 봉 다발에서의 완전발달 난류 유동에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Figure 1 과 같이 높이가 약 2m 인 3x3 봉으로 구성된 부수로 사이의 난류혼합 유동특성을 파악하기 위해 Laser-Doppler Velocimeter(LDV) 를 사용하여 주 유동방향의 평균 속도와 난류강도 및 난류 주파수를 측정하였다. 여기서는 범용 CFD 코드인 CFX-F3D 를 이용하여 위와 같은 부수로 사이의 횡류 혼합유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 즉, 벽과 내부 수로 I 과 모서리와 벽 수로 II 를 수치해석 유동장 영역으로 설정하여 주 유동방향의 평균 속도와 난류강도 분포를 계산하였다. CFX-F3D 의 Multi-block 개념을 이용하여 기하학적 형상을 모델링하고 약 50000 개의 육면체 정렬격자를 구성하였다. 또한 난류모델은 Algebraic Stress Model 을 사용하였으며 Upwind 해법을 적용하였다. 유동장 입구에서는 균일 경계조건을 부수로 사이(Gap)에서는 대칭 경계조건을 각각 가정하였다.

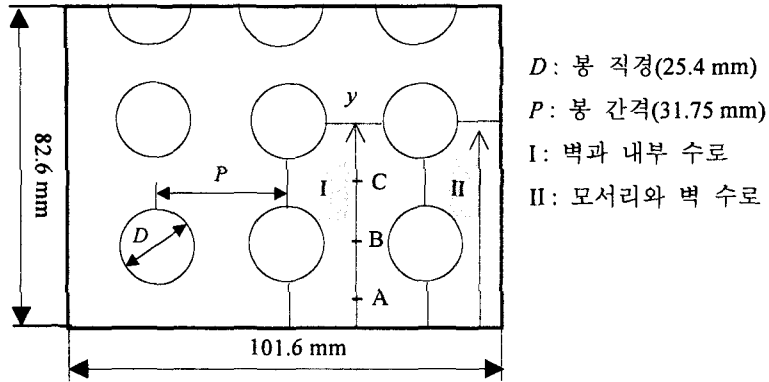
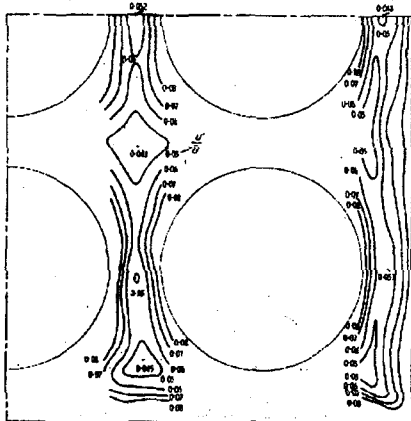


Figure 1 Cross section view of flow model

Figure 2는  $P/D=1.25$  인 경우 수로 I과 II에서의 주 유동방향의 난류강도( $u'/\bar{u}$ ) 분포를 나타낸다. Figure 2(above)에 도시한 실험결과에 따르면 내부 수로와 벽 수로 중심에서의 최소값은 각각



0.041과 0.045로 완전발달 원관 유동인 경우의 대표값인 0.035보다 다소 크다. 봉 사이에서의 최소값은 0.05와 0.052로 수로 중심에서의 값들보다 큰 것으로 나타났다. 또한 수로 중심과 봉 사이 중심과의 중간지점에서 난류강도가 상대적으로 최대가 되지만 벽면에 가까울수록 난류강도가 더욱 증가하므로 실제적으로는 'Saddle Point'가 된다. 모서리와 벽 수로 II에서도 수로 I에서와 유사한 난류강도 분포를 보이고 있다. 그러나 실험에서는 모서리 수로 난류강도 분포가 모서리 점으로 비틀어지는 경향을 나타내고 있는데 이는 모서리로 향한 2차 유동의 영향 때문인 것으로 추측된다. 수치해석을 통해 얻어진 난류강도 분포(Fig. 2(below))는 내부 수로와 벽 수로 중심에서 최소값 0.04를 나타내며 봉 사이에서의 최소치는 0.05로 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 벽면에 가까울수록 난류강도가 더욱 증가하는 현상도 실험결과와 동일하게 예측되었으나 모서리 수로에서 모서리 점으로 난류강도 분포가 비틀어지는 현상은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

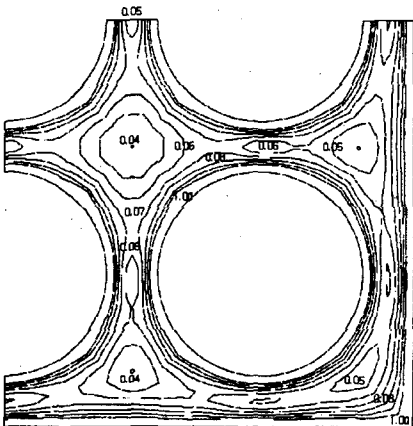


Figure 2 Axial turbulence intensity distribution for  $Re=100000$ ,  $P/D=1.25$ ; Measured(above) and Predicted (below)

Figure 3은 벽과 내부 수로 I 중심선을 따른 주 유동방향의 평균 속도와 난류강도 분포에 대한 CFX-F3D 계산결과와 실험결과를 비교한 것이다. Figure 3(a)에 나타난 주 유동방향의 평균속도 ( $\bar{u}/U_{avg}$ )는 수로 중앙에서 속도가 증가하고 봉 사이에서는 감소하는 것으로 예측되었으며 실험결과와도 잘 일치하고 있다. 또한 Reynolds 수의 영향도 실험결과와 같이 미미한 것으로 예측되었다. 주 유동방향의 난류강도( $u'/\bar{u}$ ) 분포(Fig.3(b))에 따르면 실험결과와 동일하게 벽과 내부 수로 각각의 중심(pt. A와 pt. C)과 수로 사이 중심(pt. B)에서 난류강도가 상대적으로 최소가 되는 것으로 예측되었다. 그러나 측정된 평균 난류강도가 약 0.045인 반면에 예측된 값은 약 0.055로 다소 크게 나타났다. 한편, 주 유동방향의 난류강도에 대한 Reynolds 수의 영향은 실험과 예측 결과 모두 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. Figure 4는 모서리 수로 II 중심선을 따른 CFX-F3D 계산결과와 실험결과를 비교한 것이다. 모서리 수로에서의 주 유동방향의 평균 속도(Fig. 4(a))는 측정결과와 비교적 잘 일치하며 Reynolds 수의 영향도 작은 것으로 확인되었다. Figure 4(b)에 도시한 예측된 주 유동방향의 난류강도 분포는 벽과 내부 수로 I의 경우에 비해 예측결과와 실험결과 모두 난류강도의 변화가 작지만 예측치와 측정치의 차이는 다소 크게 나타났다. 이는 모서리 수로에서 2차유동이 뚜렷하게 예측되지 않았고 난류인자에 대한 벽면 근처의 입구 경계조건이 적절하지 않게 설정되었기 때문인 것으로 판단된다.

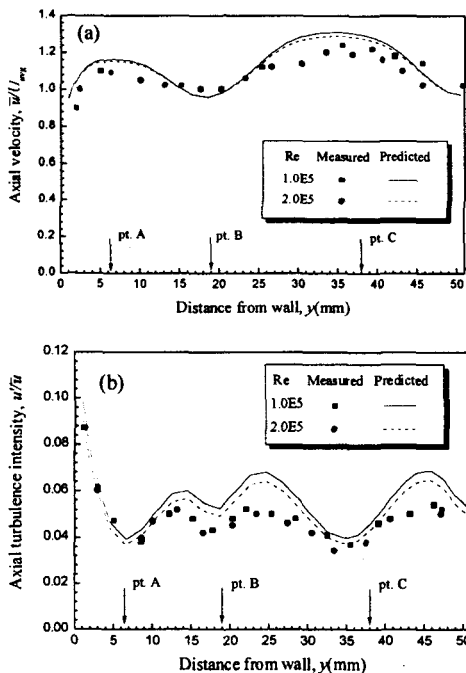


Figure 3 Axial velocity and turbulence intensity in wall and interior channel

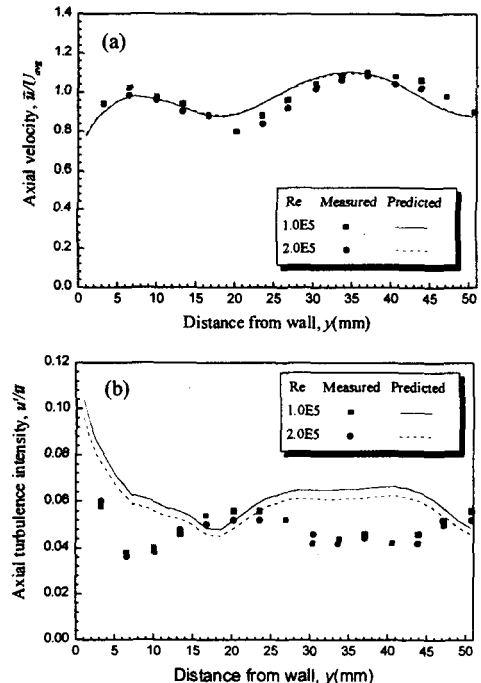


Figure 4 Axial velocity and turbulence intensity in corner and wall channel

## 2) 벽 수로 난류 유동

Rehme<sup>[2]</sup>는 높이가 7 m 인 4 개의 평행한 봉 다발 사이의 벽 수로에서의 평균 유동속도와 벽면에서의 전단응력 등을 측정하였다. 봉 직경( $D$ )은 157.5 mm, 봉 직경에 대한 봉 간격의 비( $P/D$ )와 벽과의 거리 비( $W/D$ )는 각각 1.07 이며 Reynolds 수는  $8.7 \times 10^4$  이다.  $k-\epsilon$  모델과 Upwind 해법을 사용하였으며 외벽과 봉 표면을 제외한 측면에서는 대칭 경계조건을 그리고 입구에서는 균일 경계조건을 가정하였다. Figure 5 는 주 유동방향의 평균속도 분포를 나타낸다. 봉과 외벽사이에서의 최대속도에 대한 수로 중심에서의 최대속도의 비가 측정의 경우 1.38 인 반면에 예측된 것은 약 2.0 으로 나타났다. 한편, Fig. 6 에 나타난 봉 표면과 위쪽 벽에서 계산된 벽 전단응력은 측정결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 예측된 전단응력은 측정치보다 변화가 크며 특히 봉과 외벽의 간격이 작은 영역( $x < 40$ )과 봉 표면의 양단영역( $0 < \theta < 20, 70 < \theta < 90$ )에서 전단응력이 현저히 작게 예측되었다. 이는 위와 같은 영역의 벽면근처에서 속도변화가 작게 예측되고 수로 중심선 부근에서 속도변화가 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 벽면 근처에서의 속도변화에 대한 CFX-F3D 코드의 벽 함수(Wall Function)와 전산격자의 크기에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

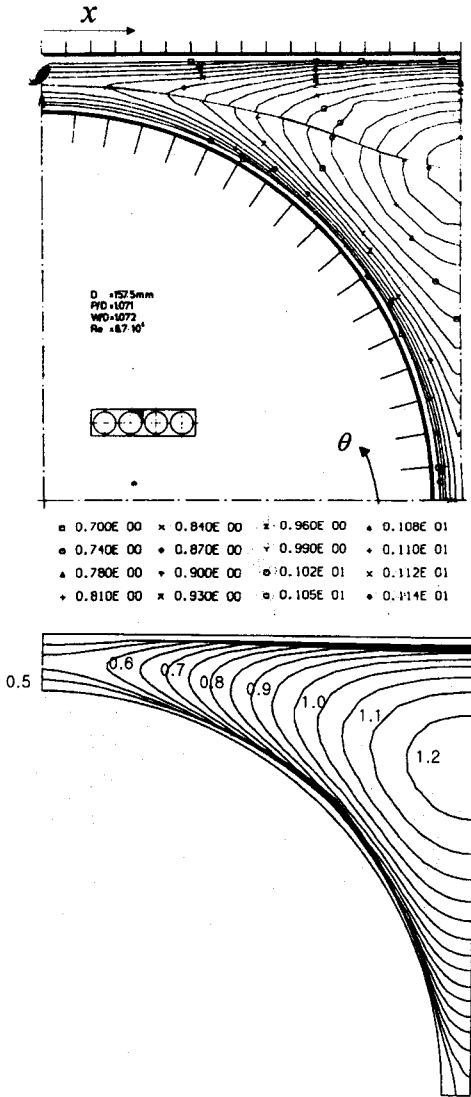


Figure 5 Comparison of relative axial velocity  
(a) Measured(above) and (b) Predicted(below)

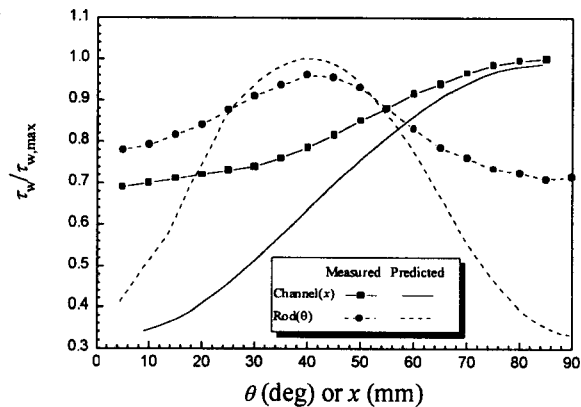


Figure 6 Comparison of experimental and predicted distributions of wall shear stresses

### 3. 결 론

범용 CFD 코드를 이용하여 3x3 봉으로 구성된 부수로 사이의 난류혼합 유동과 평행한 4 개의 봉으로 이루어진 벽 수로에서의 난류 유동구조를 수치적으로 분석하였다. 3x3 봉 사이의 난류 혼합 유동의 경우 예측된 주 유동방향의 평균 속도분포는 실험결과와 비교적 잘 일치하였으나 벽면에 인접한 수로에서의 난류강도 분포는 다소 큰 차이를 나타냈다. 평행한 4 개의 봉으로 이루어진 벽 수로 유동의 경우 실험결과와 유사한 속도와 벽 전단응력 분포를 나타냈으나 유로가 좁아지는 영역에서는 다소 큰 차이를 보였다. 따라서 보다 정확한 유동장 수치해석을 위해서는 적절한 난류모델(벽 함수 포함)의 선정과 경계조건의 설정 및 최적의 전산격자 생성이 필요한 것으로 사료된다. 그러나 이 연구를 통해 복잡한 형상의 핵연료 다발내 유동장 상세분석을 위한 CFD 코드의 활용이 가능함을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] D. S. Rowe, B. M. Johnson and J. G. Knudsen, 1974, Implications Concerning Rod Bundle Crossflow Mixing based on Measurements of Turbulent Flow Structure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **17**, pp. 407-419.
- [2] K. Rehme, 1978, The Structure of Turbulent Flow Through a Wall Subchannel of a Rod Bundle, *Nuclear Engineering and Design*, **45**, PP. 311-323.
- [3] K. Rehme, 1982, Distributions of Velocity and Turbulence in a Parallel Flow along an Asymmetric Rod Bundle, *Nuclear Technology*, **59**, pp. 148-159.
- [4] V. Vonka, 1988, Measurement of Secondary Flow Vortices in a Rod Bundle, *Nuclear Engineering and Design*, **106**, pp. 191-207.
- [5] S. V. Moller, 1992, Single-Phase Turbulent Mixing in Rod Bundles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **5**, pp. 26-33.
- [6] K. Rehme, 1992, The Structure of Turbulence in Rod Bundles and the Implications on Natural Mixing between the Subchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **35**, pp. 567-581.
- [7] Z. Karoutas, C. Y. Gu and B. Scholin, 1995, 3-D Flow Analyses for Design of Nuclear Fuel Spacer, *Proc. of the 7<sup>th</sup> Int'l Meeting on NURETH*, NY, pp. 3153-3174.
- [8] M. Imaizumi, T. Ichiko, M. Hoshi, H. Teshima, H. Kobayashi, T. Yokoyama, 1995, Development of CFD Method to Evaluate 3-D Flow Characteristics for PWR fuel Assembly, *Trans. of the 13<sup>th</sup> International Conference on SMiRT*, Brazil, pp. 3-14.
- [9] C. J. Freitas, 1995, Perspective: Selected Benchmarks from Commercial CFD Codes, *Trans. of the ASME*, **117**, pp.208-218.
- [10] AEA Technology, 1995, CFX 4.1 Flow Solver User Guide.