

지지격자 형상에 따른 봉다발 부수로 난류유동 CFD 분석

인왕기, 오동석, 황대현, 전태현

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

범용 전산유체해석(computational fluid dynamics) 코드인 CFX 를 이용하여 지지격자 형상에 따른 봉다발 부수로에서의 난류유동 수치해석을 수행하였다. ABB 와 SIMENS 가 각각 개발한 split vane 이 부착된 지지격자와 원자력연구소가 개발중인 회전유동 발생장치가 부착된 지지격자를 포함하는 부수로 난류유동을 분석하였다. 각각의 지지격자 형상에 대해 부수로에서의 축방향 속도, 횡방향 속도, 난류 운동에너지, 와류크기와 압력강하 등을 비교-분석하였다. 세가지 경우 모두 유사한 경향을 나타냈으나 SIMENS split vane 의 유동 전향날개가 크기때문에 와류와 압력강하가 다소 크게 예측되었다. 난류 운동에너지와 와류크기는 지지격자 근처에서 현저히 증가한 후 급격히 감소하는 측정결과를 CFX 예측결과에서도 확인할 수 있었다. CFX 예측결과는 지지격자 근처에서 실험결과와 다소 큰 차이를 보였으나 비교적 부수로 유동특성을 잘 나타냈다.

1. 개 요

원자로에 장전되는 핵연료다발은 연료봉과 상하단 고정체 및 지지격자로 구성되어있다. 지지격자(유동 전향날개 포함)에 의한 핵연료다발 부수로내의 와류와 부수로 사이의 난류에 의한 횡류혼합은 노심온도 분포를 균일하게 하므로 핵연료다발의 DNB 성능을 향상시키는 매우 중요한 인자이다. 또한 지지격자에 의한 압력손실도 핵연료다발의 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 핵연료다발의 성능 향상을 위해서는 부수로에서의 유동특성(속도분포, 와류크기, 압력손실 등)에 대한 이해가 필수적이다. 핵연료다발에서의 유동장은 기하학적으로 복잡하고 3차원 난류유동이므로 지금까지는 실험적인 연구가 많이 수행되었다. 그러나 최근에는 전산유체 해석기법의 발달과 컴퓨터 성능의 혁신적인 향상을 바탕으로 수치해석 연구도 시도되고 있다. 수치해석을 통한 핵연료 다발에서의 유동장 분석은 실험적 방법에 비해 소요시간이 짧고 비용도 적게 소요되므로, 핵연료다발 지지격자 형상 최적화 작업에 유용하며 또한 실험 기초자료를 제공한다.

Shen 등[1]은 LDV 를 이용하여 봉다발에서의 ripped-open 혼합날개에 의한 횡류혼합 효과를 고찰하였다. 이들은 가장 적절한 횡류혼합을 위한 혼합날개의 축방향 굽힘각도는 25° 라고 주장하였다. Karoutas 등[2]은 ABB 가 개발한 split vane 이 부착된 핵연료다발 부수로 3차원 난류유동을 실

험 및 수치적으로 분석하였다. 이들은 CFD 코드인 CFDS-FLOW3D를 이용한 수치해석 결과를 실험결과와 비교함으로써 핵연료다발 부품개발에 CFD 코드의 유용성을 보였다. Yang과 Chung[3]은 SIMENS가 개발한 split vane이 부착된 FOCUS(fuel assembly with optimized cladding and upgraded structure) 부수로내의 난류유동 특성에 대한 실험결과를 제시하였다. 이들은 지지격자로부터의 난류혼합거리와 축방향 난류감쇄 거동을 분석하였으며 국부 난류혼합계수 상관식도 제안하였다. 본 연구에서는 CFD 코드인 CFX[4]를 이용하여 ABB와 SIMENS가 각각 개발한 split vane이 부착된 지지격자와 원자력연구소가 개발중인 회전유동 발생장치가 부착된 지지격자를 포함하는 봉다발 부수로 난류유동을 비교-분석하였다.

2. 수치해석

ABB와 SIMENS의 split vane은 Fig. 1에서와 같이 지지격자 교차점에 두개의 유동 전향날개가 일체형으로 부착되어 있다. SIMENS의 split vane은 날개의 굽힘각도가 축방향으로부터 22°이며 높이가 10mm이나, ABB의 것은 높이가 약 7mm이며 날개의 굽힘각도는 알려져 있지않으므로 여기서는 SIMENS의 것과 동일하게 가정하였다. Figure 2의 회전유동 발생장치는 지지격자 교차점에 바람개비 모양의 네개의 유동 전향날개가 일체형으로 부착되어 있다. 각 날개의 높이는 4mm이고 날개의 접힘각도는 23°이다. 이와같은 유동 전향날개는 모두 부수로 내부에 와류를 발생시켜 유동혼합을 증진시키는 것이 특징이다.

수치해석을 위해 한 개의 지지격자 사이의 단일 부수로를 유동장 모델로 설정하였다. 즉, 수치해석은 지지격자 전단의 상류 30-45mm부터 시작하여 전체 해석모델의 길이를 570-670mm로 선정하였다. 부수로 입구에서의 경계조건은 지지격자와 유동 전향날개가 없는 경우의 출구조건을 사용하였으며, 봉과 봉 사이(gap)에서는 횡류혼합을 모델링하기위해 주기(periodic) 경계조건을 설정하였다. 즉, 유동장의 대칭성을 고려하여 한쪽 측면경계는 다른 측면경계와 연결되도록 하였다. 부수로 출구에서는 압력 경계조건을 설정하였다. 전산격자 수는 230000여 개이며 난류모델은 표준형 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 수렴성을 향상시키기 위해 낮은 under relaxation 인자와 Upwind 수치해법을 사용하였다. 수치계산은 HP Workstation C200 (PA8000 CPU, 512 MB RAM)을 이용하였으며 질량보존 방정식의 잉여값(residual)이 10^4 정도로 감소할 때까지 반복계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 ABB split vane에 대한 축방향 유동속도를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. CFX로 계산된 결과는 지지격자 근처에서 측정결과와 다소 큰 차이를 나타내고 있으나 비교적 측정된 유동특성을 잘 나타내고 있다. 지지격자 하류로 갈수록 유동이 발달되어가는 것을 Fig. 3의 속도분포로부터 알 수 있다. Figure 4는 횡방향 유동속도를 실험결과와 비교한 것으로 횡방향의 속도가 작게 예측되고 있으나 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 지지격자 하류로 갈수록 횡방향 유동속도가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. SIMENS split vane과 원자력연구소 회전유동 발생장치에 대한 예측결과도 유사한 경

향을 나타냈다. Figure 5는 부수로 중심과 부수로 사이(gap) 중앙에서 예측된 난류 운동에너지의 변화를 측정치와 비교한 것이다. 난류 운동에너지의 측정치는 난류 등방성(isotropy)을 가정하여 참고문헌 [3]의 측정된 축방향 난류강도로부터 추정된 것이다. 예측 결과는 실험결과보다 작게 나타났으나 실험결과와 마찬가지로 지지격자 근처에서 난류 운동에너지는 크게 증가하고 다소 떨어진 위치에서 급격히 감소하는 현상을 보이고 있다.

Figure 6은 각각의 유동 전향날개 모양에 따른 와류크기를 비교한 것이다. 부수로내 회전유동의 정도를 비교하기 위해 와류크기를 아래와 같이 정의하였다.

$$S = \frac{1}{L} \int \frac{|V_{lateral}|}{V_{avg}} dx$$

ABB split vane의 경우 예측된 와류크기는 측정결과에 비해 작게 나타났는데, 이는 강한 회전유동의 경우 표준형 $k-\epsilon$ 모델의 정확성이 떨어지며, 인접수로의 영향, 지지격자 부착물(스프링 및 덤플)과 두께 등을 정확하게 모델링하지 않았기 때문으로 판단된다. SIMENS split vane(높이 10mm, 굽힘각도 22°)이 가장 큰 와류를 발생하는 것으로 예측되었고, 원자력연구소(KAERI)가 개발중인 회전유동 발생장치 부착 지지격자의 경우 ABB split vane보다 다소 큰 와류가 발생하는 것으로 예측되었다. 그러나 세가지 형상 모두 지지격자 하류로 갈수록 와류크기가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

유동 전향날개를 포함한 지지격자 형상에 따른 압력강하 분포는 Fig. 7과 같다. 지지격자와 유동 전향날개에 의해 압력이 급격히 감소하여 지지격자 하류 약 $z/D_h=0.5-1.0$ 에서 최소가 되고 유동속도 감소에 의한 약간의 압력증가 후 약 $z/D_h=2.0$ 이후에는 붕과의 마찰손실에 의해 압력이 선형적으로 감소하는 것으로 예측되었다. 지지격자와 유동전향날개에 의한 압력손실계수는 참고문헌[3]의 측정결과가 약 1.1인 반면에 여기서는 0.49로 낮게 예측되었다. 이는 지지격자의 여러가지 부착물과 두께를 이 계산에서 무시하였기 때문이다. 또한 붕다발 부분에서 예측된 마찰계수는 0.022로 측정결과[3]인 0.024와 잘 일치였다. SIMENS 지지격자의 경우가 다른 두가지 지지격자 형상에 비해 압력강하가 다소 크게 예측되었는데, 이는 지지격자 높이가 약 5mm 크고 유동 전향날개의 높이도 약간 크기때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

CFD 코드를 이용하여 ABB와 SIMENS가 각각 개발한 split vane이 부착된 지지격자와 원자력연구소가 개발중인 회전유동 발생장치가 부착된 지지격자를 포함하는 부수로 난류유동을 분석하였다. 각각의 지지격자 형상에 대해 부수로에서의 축방향 속도, 횡방향 속도, 난류 운동에너지, 와류크기와 압력강하 등을 비교-분석하였다. 세가지 형상 모두 부수로내 회전유동이 발생되고 지지격자 하류로 갈수록 와류크기가 감소하는 것으로 나타났다. 지지격자와 회전유동 발생장치에 의해

난류 운동에너지와 압력손실이 크게 증가하는 것도 확인할 수 있었다. 지지격자 근처에서 예측결과는 실험결과와 정량적으로 다소 큰 차이를 나타냈으나 지지격자 형상에 따른 부수로 유동특성을 잘 나타냈다.

기호설명

D_h	Hydraulic diameter (m)
k	Turbulent kinetic energy (m^2/sec^2)
L	Length of integral path
P	Pressure (N/m^2)
V	Velocity (m/sec)
ρ	Fluid density (kg/m^3)

참고문헌

- [1] Y.F. Shen, Z.D. Cao and Q.G. Lu, 1991, An Investigation of Crossflow Mixing Effect caused by Grid Spacer with Mixing Blades in a Rod Bundle, *Nuclear Engineering and Design*, **125**, pp. 111-119.
- [2] Z. Karoutas, C.Y. Gu, and B. Scholin, 1995, 3-D Flow Analysis for Design of Nuclear Fuel Spacer, *Proc. Of the 7th Int'l Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*, Sept. 10-15, New York.
- [3] S.K. Yang and M.K. Chung, 1996, Spacer Grid Effects on Turbulent Flow in Rod Bundles, *J. of the Korean Nuclear Society*, **28**, 1, pp. 56-71.
- [4] AEA Technology, 1995, CFX 4.1 Flow Solver User Guide.

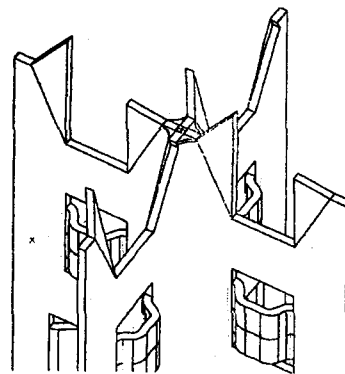
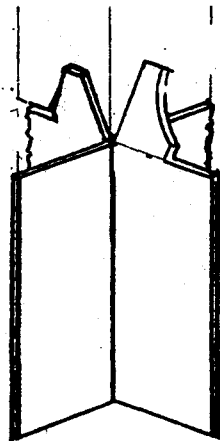


Fig. 1 Schematic of split vane (ABB, SIMENS) Fig. 2 Schematic of swirl flow generator (KAERI)

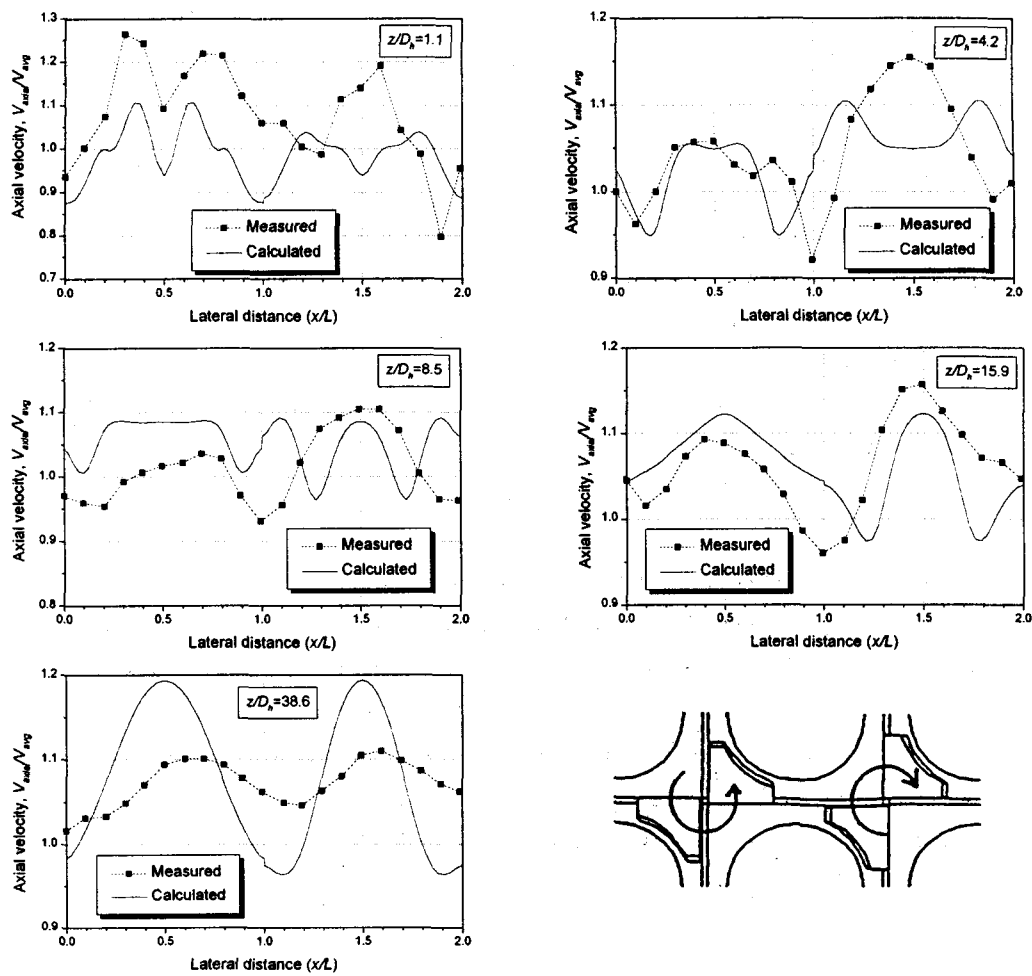


Fig. 3 Axial velocity comparison for ABB split vane

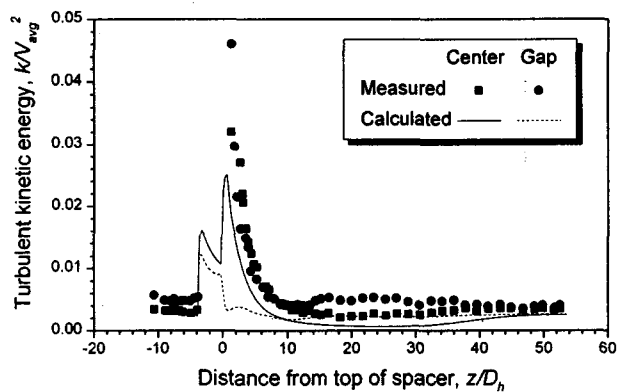


Fig. 5 Variation of turbulent kinetic energy for SIMENS split vane

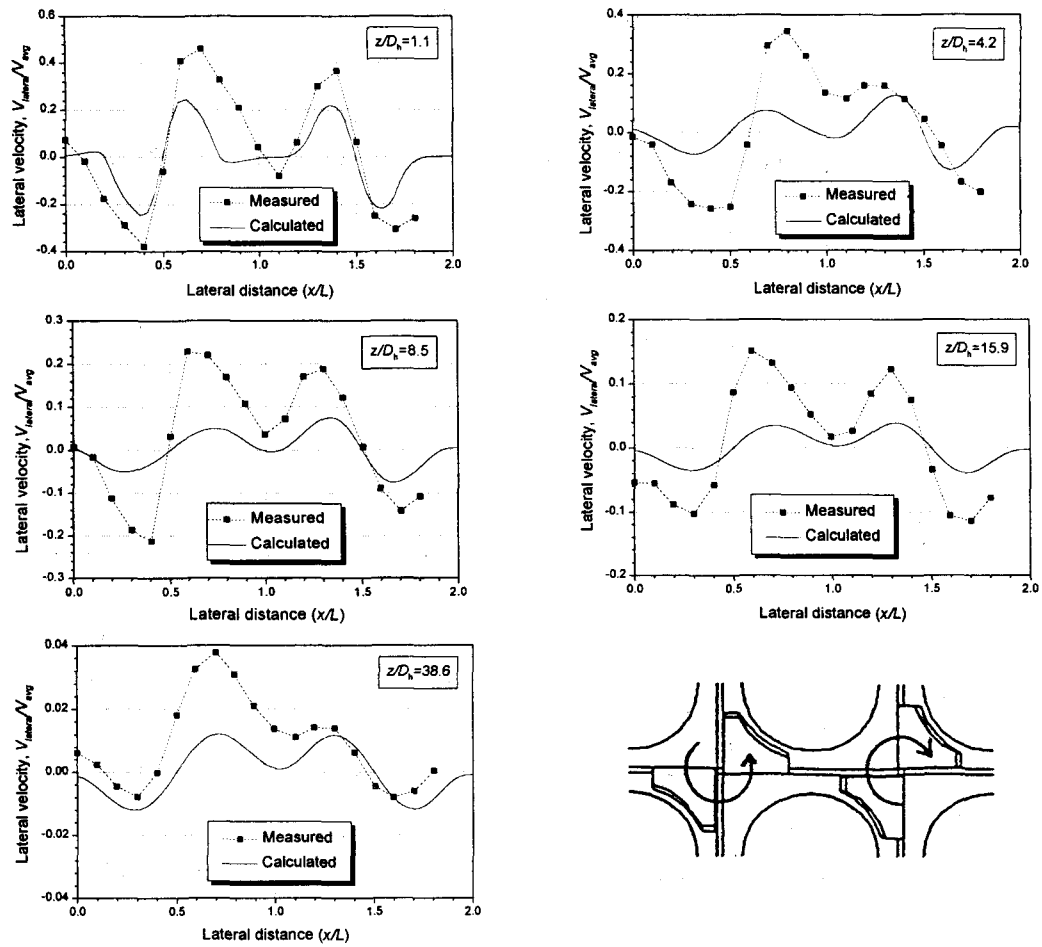


Fig. 4 Lateral velocity comparison for ABB split vane

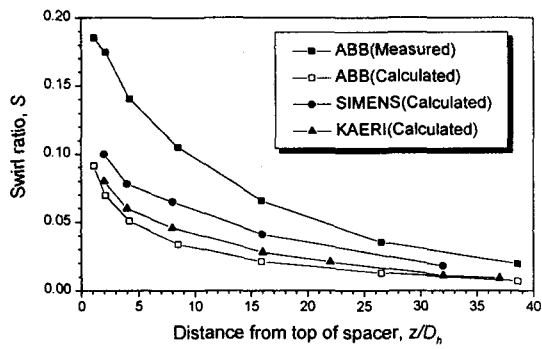


Fig. 6 Swirl ratio comparison

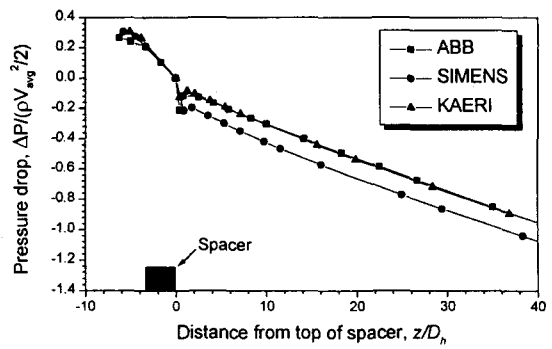


Fig. 7 Predicted pressure distributions