

CFD 우수사례 지침을 적용한 관 다발 주위의 난류유동 수치해석

이공희^{*†} · 방영석^{*} · 우승웅^{*} · 정애주^{*}

* 한국원자력안전기술원 건설원자력규제단

Numerical Analysis of Turbulent Flow around Tube Bundle by Applying CFD Best Practice Guideline

Gong Hee Lee^{*†}, Young Seok Bang^{*}, Sweng Woong Woo^{*} and Ae Ju Cheng^{*}

* New Reactor Regulation Division, Korea Institute of Nuclear Safety

(Received January 9, 2013 ; Revised June 26, 2013 ; Accepted July 23, 2013)

Key Words: Best Practice Guideline(우수사례 지침), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Tube Bundle(관 다발), Turbulent Flow(난류유동)

초록: 본 연구에서는 상용 전산유체역학 소프트웨어인 ANSYS CFX V.13을 사용하여 정상상태, 비압축성, 등온으로 가정된 엇갈림 관 다발 및 일렬 관 다발 주위의 난류유동을 계산하였다. 계산 결과는 전산유체역학 우수사례 지침에 근거하여 격자크기, 대류항 차분법의 정확도 및 난류모델에 대한 민감도 연구에 활용되었고 실험 결과와 정량적으로 비교함으로써 우수사례 지침의 적용성을 평가하였다. 결론적으로 전산유체역학 우수사례 지침이 관 다발 유동 분야에서 상용 전산유체역학 소프트웨어의 예측성능 향상을 반드시 보증하지 않음을 확인하였다.

Abstract: In this study, the numerical analysis of a turbulent flow around both a staggered and an inline tube bundle was conducted using ANSYS CFX V.13, a commercial CFD software. The flow was assumed to be steady, incompressible, and isothermal. According to the CFD Best Practice Guideline, the sensitivity study for grid size, accuracy of the discretization scheme for convection term, and turbulence model was conducted, and its result was compared with the experimental data to estimate the applicability of the CFD Best Practice Guideline. It was concluded that the CFD Best Practice Guideline did not always guarantee an improvement in the prediction performance of the commercial CFD software in the field of tube bundle flow.

- 기호설명 -

- d : 관 외경(mm)
- x, y : 주유동방향, 횡방향
- U, V : 주유동방향, 횡방향 속도(m/s)
- U_{ref} : 입구 속도(m/s)

1. 서론

원자로 및 증기발생기 등에서 볼 수 있는 관 다발 주위의 유동은 경계층 박리, 재순환 유동, 와류 상호작용과 같은 다양한 유동 현상들의 결

합으로 인해 매우 복잡한 형태를 나타내며 해당 기기의 성능 및 건전성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 관 다발 주위의 유동 특성을 잘 이해하는 것은 해당 기기의 설계시 중요한 요소이다.

관 다발 주위의 유동 특성과 관련해서 초창기 연구는 주로 열전달 및 압력 강하에 대한 상관식 개발 분야에서 집중적으로 수행되어 왔다.⁽¹⁾ 또한 유동 가시화 장치들이 개발되면서 유체 유발 진동의 발생 메커니즘을 파악하기 위한 연구가 많이 수행되었다.⁽²⁾

한편 관 다발 주위의 유동을 정확하게 예측하기 위한 다수의 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 계산이 수행되어 왔다.^(3,4) 그러나, CFD 계산에 사용된 난류모델 등의 제한성으로 인해 예측된 평균 속도 및 레이놀즈 응력 크기가 실

† Corresponding Author, ghlee@kins.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

험값과 다소 차이가 나는 것으로 확인되었다.

한편 현재 국내의 경우 원자력 규제기관으로부터 인허가를 받은 상용 CFD 소프트웨어는 없다. 또한 CFD 소프트웨어의 종합적인 평가를 위한 지침이 마련되어 있지 않다. 그러나 최근 들어 상용 CFD 소프트웨어를 이용한 계산 결과를 원자력발전소 안전성 확인과 관련된 인허가 신청에 활용하는 경우가 증가하는 추세이다. 대표적인 예로 캔두형 원전에서 칼란드리아 내부의 감속재 열유동 해석, 격납 건물 바닥에서의 이물질 거동 해석 등이 있다.

해외의 경우 원자력 안전 분야에 대한 CFD 소프트웨어의 종합적인 평가를 위한 소프트웨어 확인(verification) 및 검증(validation) 관련 CFD 우수사례 지침⁽⁵⁾이 발간되었다. 따라서 국내 원자력 안전 분야에 대한 규제 관점에서 상용 CFD 소프트웨어의 예측 성능에 대한 체계적인 평가 및 지침 마련이 필요하다.

본 연구에서는 원자력 안전 분야에 대한 상용 CFD 소프트웨어의 예측 성능을 체계적으로 평가하기 위해 Paul 등⁽⁶⁾의 엇갈림(staggered) 관 다발 및 Balabani 등⁽⁷⁾의 일렬(in-line) 관 다발 실험에 대해서 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS CFX⁽⁸⁾에 탑재된 수치모델을 이용하여 계산을 수행하였고 계산 결과를 실험 결과와 정량적으로 비교함으로써 CFD 우수사례 지침⁽⁵⁾의 적용성을 평가하였다.

2. 해석모델

2.1 엇갈림 관 다발

Fig. 1은 계산에 사용된 엇갈림 관 다발 실험장

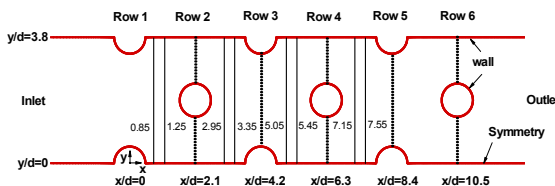


Fig. 1 Schematic diagram of test rig for a staggered tube bundle

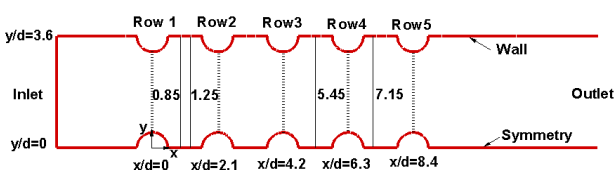


Fig. 2 Schematic diagram of test rig for an in-line tube bundle

치의 개략도를 나타낸다. 관 다발은 외경이 25.4mm인 6열의 원형관으로 구성되며 엇갈림 형태로 배치되었다. 주유동방향(x) 및 횡방향(y)으로의 피치-직경비는 각각 2.1 및 3.8이다. 원형관의 길이-직경비가 7.5이므로 관의 중간부분에서 측정된 평균 유동은 끝단 벽(endwall)의 영향을 받지 않는 2차원 형태로 간주할 수 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 레이놀즈 수 $Re=9,300$ 에서 측정된 실험값과 계산값을 비교하였다. 비교 위치는 횡방향으로 $0 \leq y/d \leq 3.8$ 범위에서 주유동방향으로 $x/d=0.85, 1.25, 2.95, 3.35, 5.05, 5.45, 7.15$ 및 7.55 이다. Paul 등⁽⁶⁾에 따르면 $x/d=-10$ 에서 측정된 평균 속도는 유로의 70%에 걸쳐 균일하며 경계층 두께는 34mm이었다. 유로의 중앙부에서 주유동방향 난류강도는 4%이다.

2.2 일렬 관 다발

Fig. 2는 계산에 사용된 일렬 관다발 실험장치의 개략도를 나타낸다. 관 다발은 외경이 10.0mm인 5열의 원형관으로 구성되며 일렬 형태로 배치되었다. 주유동방향 및 횡방향으로의 피치-직경비는 각각 2.1 및 3.6이다. 원형관의 길이-직경비가 7.2이므로 2.1절의 엇갈림 관 다발의 경우와 동일하게 관의 중간부분에서 측정된 평균 유동은 2차원 형태로 간주할 수 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 레이놀즈 수 $Re=12,858$ 에서 측정된 실험값과 계산값을 비교하였다. 비교 위치는 횡방향으로 $0 \leq y/d \leq 3.6$ 범위에서 주유동방향으로 $x/d=0.85, 1.25, 5.45$ 및 7.15 이다.

3. 수치모델링

3.1 수치해법

본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS CFX⁽⁸⁾를 이용하여 비압축성, 정상 상태, 등은 조건 하에서 엇갈림 및 일렬 관 다발 주위의 난류유동을 계산하였고, 이를 실험값과 정량적으로 비교함으로써 CFD 우수사례 지침의 적용성을 평가하였다. 개별 방정식들의 제곱평균(root mean square) 오차가 10^{-6} 이하가 될 때 수렴된 것으로 판정하였다. 상기 수렴 조건은 ANSYS CFX 매뉴얼⁽⁹⁾에서 권고하는 수렴 조건(10^{-5} 이하)보다 엄격한 것이다.

3.2 난류모델

관 다발 주위의 난류 유동의 예측 성능을 평가하

기 위해 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식에 기반한 5가지 유형의 난류 모델인 $k-\epsilon$ 모델, RNG $k-\epsilon$ 모델, $k-\omega$ 기반 SST 모델, 준 등방성(Quasi-Isotropic) 레이놀즈 응력 모델 및 Baseline 레이놀즈 응력 모델을 사용하였다. 또한 벽 근처의 유동을 모델링하기 위해 SST 모델 및 Baseline 레이놀즈 응력 모델에서는 자동 근접벽 처리법(automatic near-wall treatment)을, $k-\epsilon$ 모델, RNG $k-\epsilon$ 모델 및 준 등방성 레이놀즈 응력 모델에서는 가변 벽함수(scalable wall function)를 사용하였다. 각 난류 모델 및 벽 근처 유동 모델링에 대한 상세한 설명은 ANSYS CFX 매뉴얼⁹⁾에서 확인할 수 있다.

3.3 격자계

Fig. 3은 Fig. 1의 엇갈림 관 다발 주위의 난류유동 계산을 위해 사용된 4가지 형태의 격자계를 나타낸다. 격자 형태는 다중 블록(multi-block) 육면체 격자이다. Table 1에서는 격자계 정보를 요약하였다. 일렬 관 다발에 대한 격자 형태가 엇갈림 관 다발에 대한 것과 유사하므로 해당 격자 형태를 별도의 그림으로 나타내지는 않았다.

한편 엇갈림 관 다발에 대한 격자수가 일렬 관 다발에 비해 상대적으로 많은 이유는 엇갈림 관 다발의 계산영역이 일렬 관 다발에 비해 크기 때문이다.

3.4 경계조건

엇갈림 관 다발 주위의 난류유동 해석을 위해 레

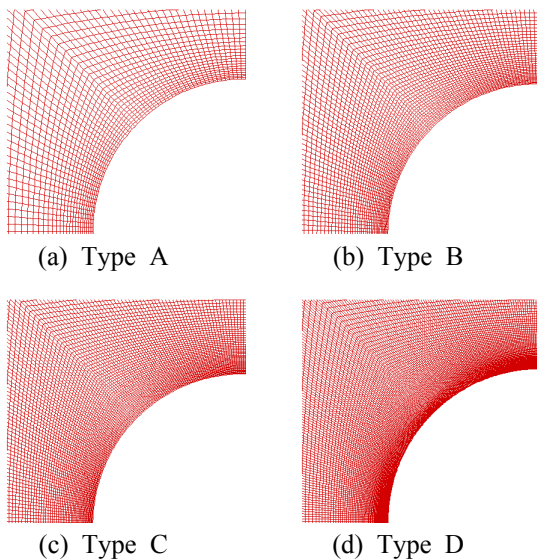


Fig. 3 Grid system for the staggered tube bundle

이놀즈 수 $Re=9,300$ 에 해당하는 평균 속도 0.34m/s 를 입구 경계면에 수직인 방향으로 균일하게 적용하였다. 또한 입구에서의 난류 강도는 실험값을 반영하여 4.0%를 적용하였다. 출구 경계면에서는 평균 정압(static pressure) 조건을 적용하였다. 관 표면을 포함한 모든 벽 경계면에는 점착(no-slip) 조건을, 대칭면에는 대칭 조건을 적용하였다. 관 다발의 중간 높이에서 유동이 2차원 특성을 나타냄이 실험에서 확인되었으므로 격자수를 감소시키기 위해 높이 방향으로 3개의 격자를 배치하였고 대칭 조건을 부과하였다.

일렬 관 다발의 경우에는 입구 경계조건을 제외한 나머지 경계조건은 엇갈림 관 다발 해석에 적용한 것과 동일하다. 입구 경계면에서는 평균 속도 0.93m/s 를 입구 경계면에 수직인 방향으로 균일하게 적용하였다. 또한 입구에서의 난류 강도는 4.0%를 적용하였다.

4. 결과

4.1 엇갈림 관 다발

4.1.1 격자 민감도

CFD 우수사례 지침에서는 동일 형상에 대해 3가지 이상의 격자계를 사용할 것을 권고하고 있다. 이에 따라 본 절에서는 4가지 격자 형태에 대해서 격자 민감도 영향을 평가하였다.

Fig. 4는 횡방향 대칭면($y=0$)을 따라 측정 및 예측된 주유동방향 평균 속도 형상을 나타낸다. 그림에서 hi-hi는 운동량 방정식 및 난류 방정식의 대류항에 고차 정확도 차분법(high resolution scheme)이 사용되었음을 의미한다. 상기와 같은 주유동방향 평균 속도는 재순환 길이에 대한

Table 1 Summary of grid system

Grid type		A	B	C	D
Parameters	Staggered	303,264	616,554	1,052,304	2,226,084
	In-line	139,653	312,441	552,903	1,239,753
Min. Orthogonal quality	Staggered	0.712	0.710	0.709	0.709
	In-line	0.714	0.712	0.710	0.709
Max. aspect ratio	Staggered	44.8	67.3	89.7	134.5
	In-line	15.59	23.48	31.44	93.54
y^+	Staggered	12.1	8.66	6.8	1.34
	In-line	8.5	6.15	4.84	1.83

정보를 제공한다. 재순환 길이는 횡방향 대칭면 ($y = 0$)에서 관 후미 표면과 주유동방향 평균 속도가 0이 되는 위치 사이의 x방향 거리로 정의될 수 있다.

Fig. 4(a) 및 4(b)에서 k-ε 모델은 실험값에 비해 재순환 길이를 작게 예측한 반면 SST 모델은

재순환 길이를 크게 예측함을 확인할 수 있다. Fig. 4(c) 및 4(d)에서는 k-ε 모델의 예측성능이 SST 모델에 비해 우수함을 확인할 수 있다. 한편 Fig. 4에서는 SST 모델이 k-ε 모델에 비해 상대적으로 격자수에 민감함을 확인할 수 있다. 또한 SST 모델은 격자수가 증가할수록 실험값과의 불일치 정도가 증가함을 확인할 수 있다. 상기 결과는 조밀한 격자 사용이 일반적으로 우수한 예측성능을 나타내는 것과 상반된다.

4.1.2 대류항 차분 정확도에 따른 민감도

공간 차분 오차들은 차분법의 정확도 및 격자 크기로부터 발생한다. 일반적으로 2차 정확도 이상의 공간 차분법들이 고품질의 계산결과를 도출할 수 있는 것으로 알려져 있다. 또한 유동이 격자선과 나란하지 않거나 복잡한 유동에 대해서는 1차 정확도의 차분법을 가급적 사용하지 말 것을 권고하고 있다. 본 절에서는 대류항의 차분 정확도가 예측 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 격자 독립 결과를 제시한 격자 유형 D인 경우에 대해 운동량 방정식 및 난류 방정식의 차분 정확도를 각각 1차 풍상차분법(upwind scheme), 고차 정확도 차분법-1차 풍상차분법, 고차 정확도 차분법으로 구분하여 계산을 수행하였고 계산결과를 실험값과 비교하였다.

Fig. 5 및 6은 축방향 위치들에서 예측된 주유동방향 및 횡방향 평균 속도 형상을 실험값과 비교한 것이다. k-ε 모델의 경우 대류항의 차분 정확도가 계산 결과에 미치는 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다. 또한 운동량 방정식의 대류항을 고차 정확도로 고려하면 난류 방정식의 대류항 차분 정확도는 해석 결과에 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 상기와 같은 결과는 ANSYS CFX 매뉴얼⁽⁹⁾에서도 확인할 수 있다. 동 매뉴얼에서는 기본적으로 운동량 방정식의 대류항을 고차 정확도로 고려한 반면 난류 방정식에 대해서는 1차 정확도로 고려하고 있다. 이는 계산 결과의 정확도를 일정 부분 유지하면서 수렴성을 향상시키기 위한 조치로 판단된다.

한편 k-ω 기반 SST 모델의 경우에는 운동량 방정식의 대류항의 차분 정확도에 따라 계산 결과의 차이가 크게 나타났다. 즉, Fig. 5의 (b)~(d)에서 차분 정확도가 감소할수록 주유동방향 평균속도의 최대값이 감소함을 확인할 수 있다. 이는

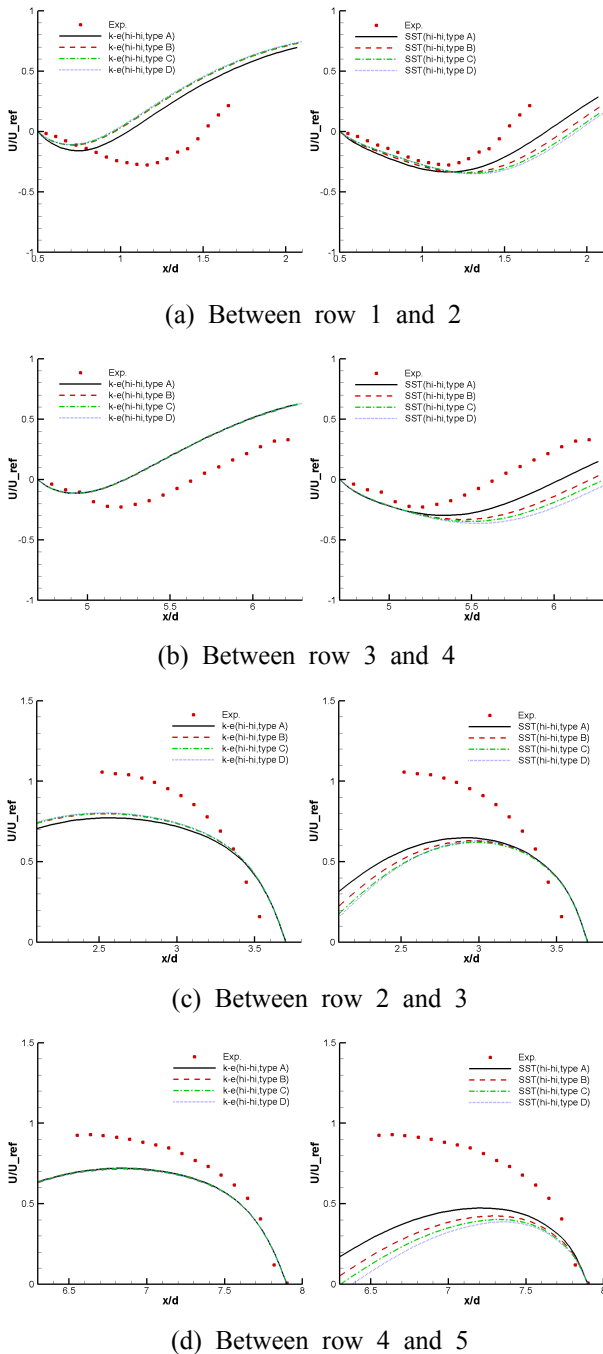
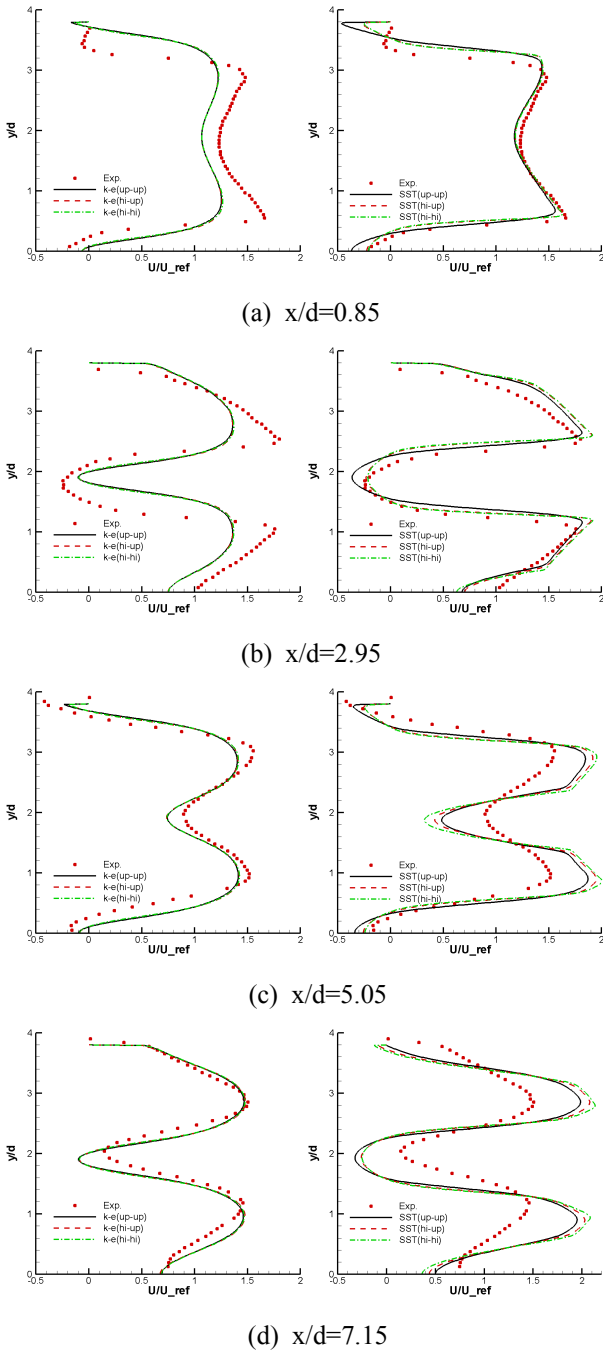


Fig. 4 Comparison of streamwise mean velocity profile at the selected axial locations (left side: k-ε model, right side: SST model)



(a) $x/d=0.85$

(b) $x/d=2.95$

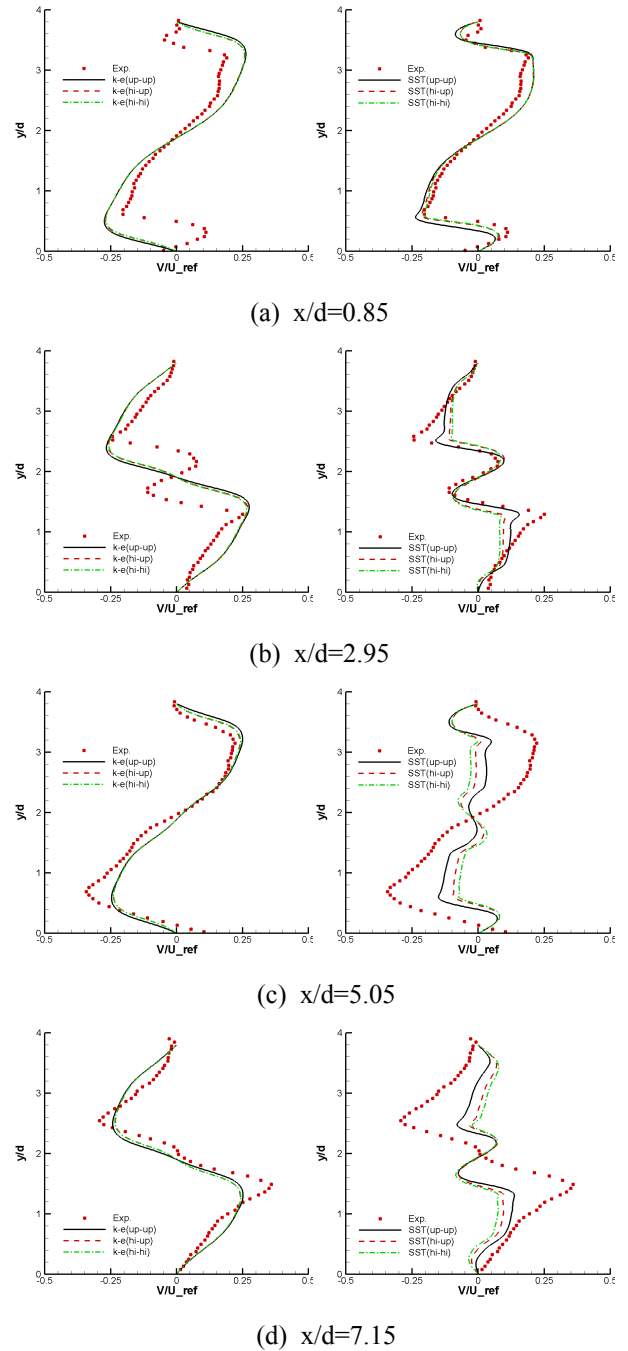
(c) $x/d=5.05$

(d) $x/d=7.15$

Fig. 5 Comparison of streamwise mean velocity profile at the selected axial locations (left side: k-ε model, right side: SST model)

낮은 차분 정확도의 사용에 따른 수치적 확산 (numerical diffusion)의 증가로부터 비롯된 것으로 판단된다. 또한 Fig. 5의 (b)~(d)에서 차분 정확도의 증가가 반드시 실험 결과를 잘 예측하는 것이 아님을 확인할 수 있다.

이는 CFD 우수사례 지침에서 고차 정확도의 대류항 처리를 권고한 것과 다른 결과이다.



(a) $x/d=0.85$

(b) $x/d=2.95$

(c) $x/d=5.05$

(d) $x/d=7.15$

Fig. 6 Comparison of transverse mean velocity profile at the selected axial locations (left side: k-ε model, right side: SST model)

4.1.3 난류모델 민감도

격자 유형이 D이고 운동량 및 난류 방정식의 대류항을 고차 정확도 차분법으로 처리한 경우에 대해 난류모델의 예측성능을 비교하였다.

CFD 우수사례 지침에 따라 일반적인 유동해석 용으로 적합하지 않은 1-방정식 난류 모델 및 Wilcox의 k-ω 모델은 비교 대상에서 제외하였다.

Fig. 7은 축방향 위치들에서 예측된 주유동방향 평균 속도 형상을 실험값과 비교한 결과를 나타낸다. 유동이 발달하는 영역($0.85 \leq x/d \leq 3.35$)에서는 ω 계열 난류모델(SST 모델, Baseline 레이놀즈 응력 모델)의 예측 성능이 상대적으로 우수하였다. ϵ 계열 난류모델(k- ϵ 모델, RNG k- ϵ 모델, 준 등방성 레이놀즈 응력 모델)은 실험값에 비해 상대적으로 주유동방향 속도 크기를 작게 예측하였다. 한편, 주유동이 발달된 영역($x/d \geq 5.05$)에서는 ϵ 계열 난류모델의 예측성능이 우수하였다. 반면에 ω 계열 난류모델은 실험값에 비해 상대적으로 주유동방향 속도 크기를 크게 예측하였다. 상기와 같은 예측 성능이 나타나는 이유는 ϵ 계열 난류모델이 관의 첫 번째 열부터 완전 발달된 유동으로 가정하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 축방향 위치들에서 예측된 횡방향 평균 속도 형상을 실험값과 비교한 결과를 나타낸다. 관 다발 초반부($x/d = 1.25$)에서 ω 계열 난류모델은 ϵ 계열 난류모델에 비해 우수한 예측성능을 나타내었으나, 이후로는 예측된 횡방향 평균 속도 형상의 경향성이 실험값과 다르며, 속도 크기도 크게 차이남을 확인할 수 있다.

반면에 ϵ 계열 난류모델은 관 다발 중간이후부터 측정된 횡방향 속도형상과 유사한 예측 경향성을 나타내었다. 다만 ϵ 계열 난류모델도 $x/d = 3.35$

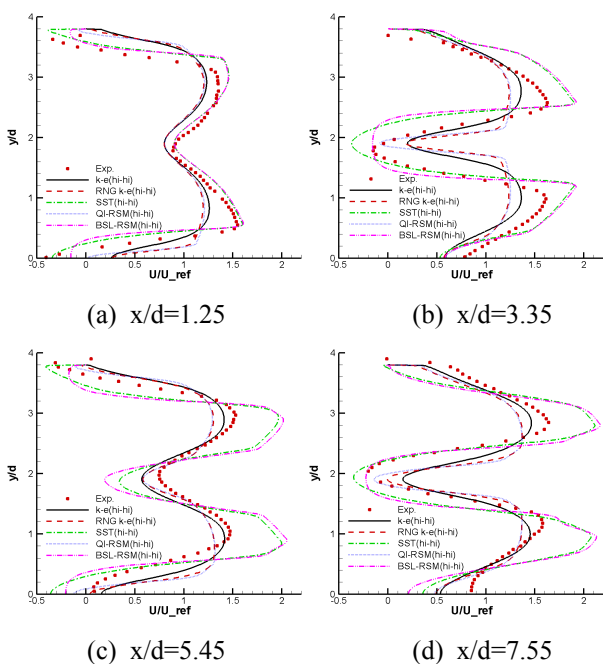


Fig. 7 Comparison of streamwise mean velocity profile at the selected axial locations

및 7.55에서 첨두 속도값을 가지는 부분에서 예측 성능이 떨어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 주유동방향 속도 분포를 나타낸다. 관 후미영역에서는 재순환 영역이 존재하며, 예측된 재순환 영역의 크기는 관 다발의 후반부로 갈수록 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 특히 마지막 열의 경우 유동 하류가 원형관에 의해 제한되지 않기 때문에 재순환 영역이 가장 크게 나타나는 것으로 판단된다. 난류모델의 예측성능과 관련하여 ω 계열 난류모델(Fig. 9(c),(e))이 ϵ 계열 난류모델(Fig. 9(a),(b),(d))에 비해 재순환 영역을 상대적으로 크게 예측함을 확인할 수 있다. Paul 등⁽⁶⁾의 실험에서는 원형관의 마지막 열의 하류영역에서 유동장을 측정하지 않았다. 따라서 원형관의 마지막 열 후미에서 발생한 재순환 영역에 대한 난류모델의 예측성능을 정확히 평가하기 위해서는 상기 위치에서의 유동장 측정이 필요하다.

4.2 일렬 관 다발

4.2.1 격자 민감도

CFD 우수사례 지침에 따라 4가지 격자 형태에 대해서 격자 민감도 영향을 평가하였다.

Fig. 10은 횡방향 대칭면($y = 0$)을 따라 측정 및 예측된 주유동방향 평균 속도 형상을 나타낸다.

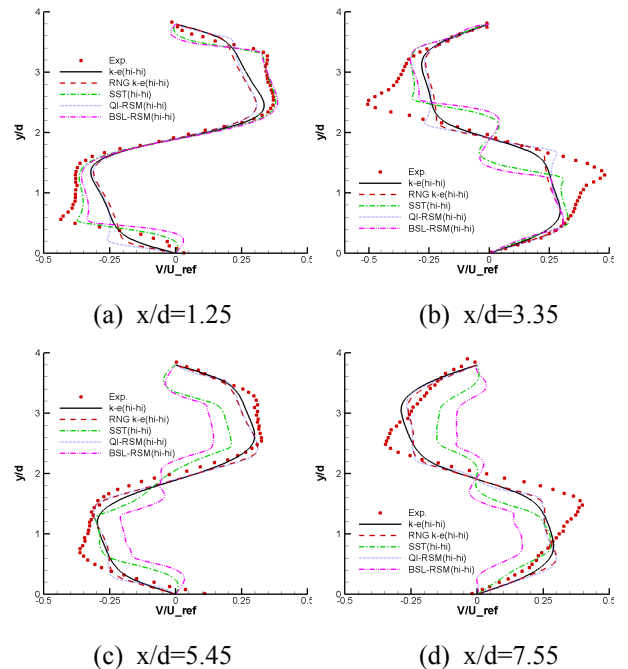


Fig. 8 Comparison of transverse mean velocity profile at the selected axial locations

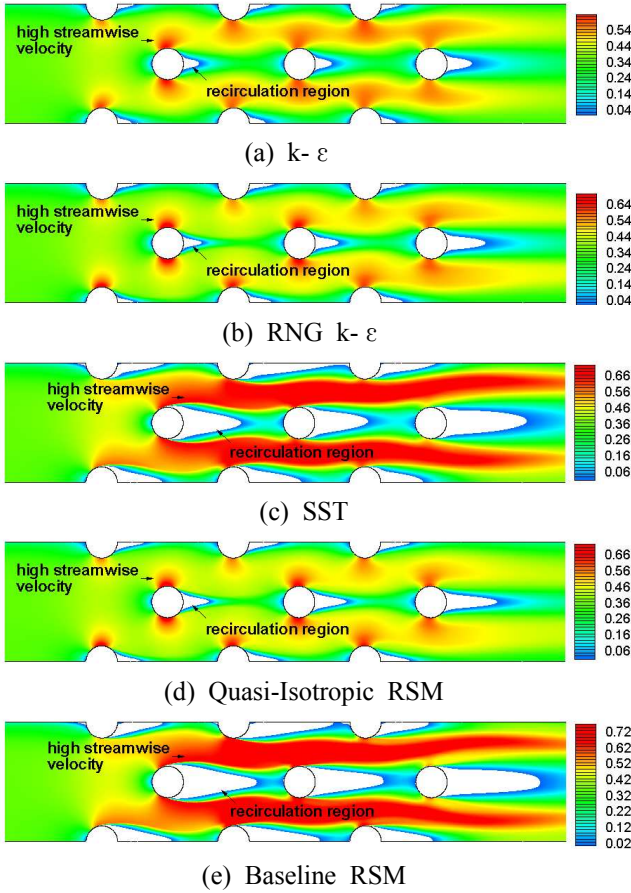


Fig. 9 Comparison of streamwise mean velocity contours

유동이 발달하는 영역인 원형관의 1열과 2열 사이에서는 SST 모델의 예측 성능이, 유동이 어느 정도 발달된 영역인 원형관의 2열과 3열 사이에서는 $k-\epsilon$ 모델의 예측성능이 상대적으로 우수하였다. 또한 엇갈림 관 다발에서의 계산결과와 유사하게 SST 모델은 $k-\epsilon$ 모델에 비해 상대적으로 격자수에 민감하였고 격자수가 증가할수록 실험값과의 불일치 정도가 증가함을 확인할 수 있다.

4.2.2 대류항 차분 정확도에 따른 민감도

일렬 관 다발에 대한 대류항 차분 정확도에 따른 민감도 평가방식은 엇갈림 관 다발에 대한 것과 동일하다.

Fig. 11은 축방향 위치들에서 예측된 주유동방향 평균 속도 형상을 실험값과 비교한 것이다. 엇갈림 관 다발에서의 계산결과와 유사하게 $k-\epsilon$ 모델의 경우 대류항의 차분 정확도가 계산 결과에 미치는 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다.

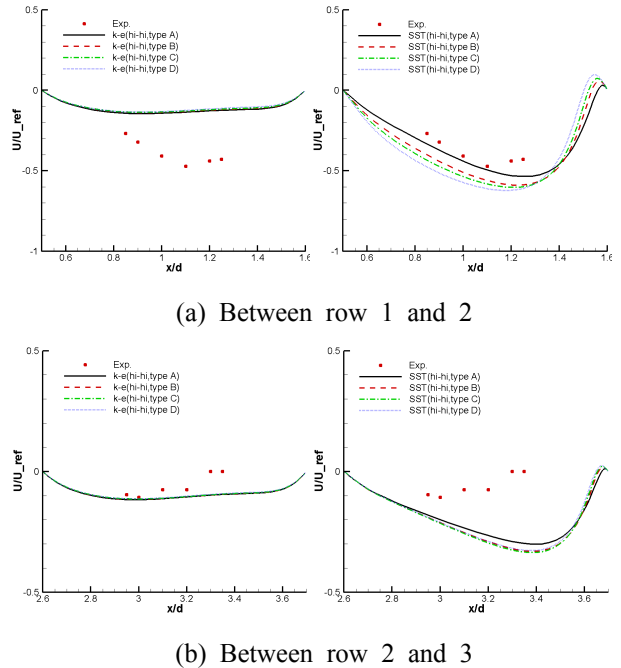


Fig. 10 Comparison of streamwise mean velocity profile at the selected axial locations (left side: $k-\epsilon$ model, right side: SST model)

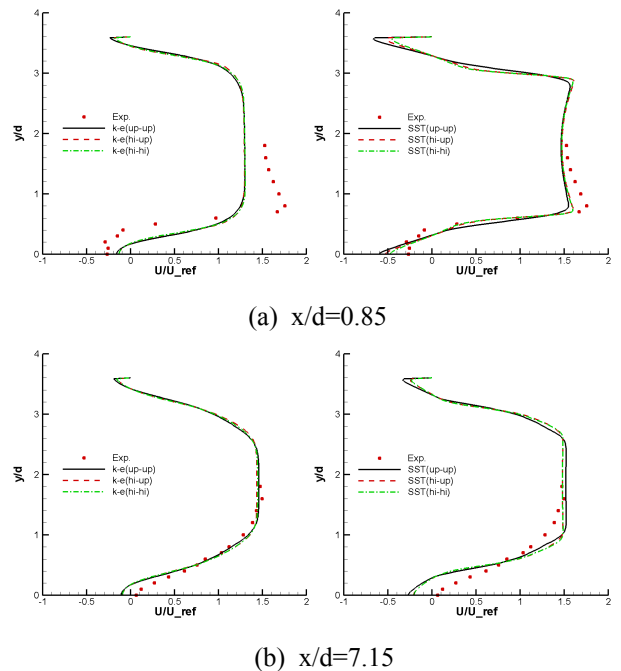


Fig. 11 Comparison of streamwise mean velocity profile at the selected axial locations (left side: $k-\epsilon$ model, right side: SST model)

$k-\omega$ 기반 SST 모델의 경우에는 운동량 방정식의 대류항의 차분 정확도에 따라 계산 결과의 차이가 일부 존재하였으나, 엇갈림 관 다발에서의 차이보다는 작은 것으로 확인되었다.

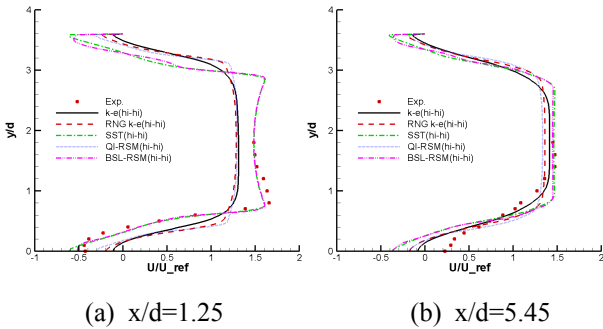


Fig. 12 Comparison of streamwise mean velocity profile at the selected axial locations

4.2.3 난류모델 민감도

일렬 관 다발에 대한 난류모델 민감도 평가방식은 엇갈림 관 다발에 대한 것과 동일하다. 즉, 격자 유형이 D이고 운동량 및 난류 방정식의 대류항을 고차 정확도 차분법으로 처리한 경우에 대해 난류모델의 예측성능을 비교하였다.

Fig. 12는 축방향 위치들에서 예측된 주유동방향 평균 속도 형상을 실험값과 비교한 결과를 나타낸다. 엇갈림 관 다발에 대한 계산결과와 유사하게 유동이 발달하는 영역($x/d = 1.25$)에서는 ω 계열 난류모델(SST 모델, Baseline 레이놀즈 응력 모델)의 예측 성능이 상대적으로 우수하였다.

한편 주유동이 발달된 영역($x/d = 5.45$)에서는 $k-\epsilon$ 모델의 예측성능이 가장 우수하였으나 엇갈림 관 다발에 대한 계산결과와는 다르게 ϵ 계열과 ω 계열 난류모델간의 예측성능은 큰 차이를 나타내지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 Paul 등⁽⁶⁾ 및 Balabani 등⁽⁷⁾이 수행한 엇갈림 및 일렬 관 다발 실험에 대해서 상용 유동해석 소프트웨어인 ANSYS CFX V.13에 탑재된 수치모델링을 이용하여 계산을 수행하였고 계산 결과를 실험 결과와 정량적으로 비교함으로써 CFD 우수사례 지침의 적용성을 평가하였다. 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 격자 민감도 평가 결과, $k-\omega$ 기반의 SST 모델이 $k-\epsilon$ 모델에 비해 상대적으로 격자형태에 민감함을 확인하였다. 또한 SST 모델은 격자수가 증가할수록 실험값과의 불일치 정도가 증가함을 확인하였다. 상기와 같은 결과는 일반적으로 조밀한 격자의 사용이 우수한 예측 성능을 나타내

는 것과 차이가 있다.

(2) 대류항 차분 정확도에 따른 민감도 평가 결과, $k-\epsilon$ 모델의 경우 차분 정확도가 계산 결과에 크게 영향을 미치지 않는 반면, $k-\omega$ 기반의 SST 모델에서는 운동량 방정식의 대류항 차분 정확도에 따라 상대적으로 계산 결과에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 엇갈림 관 다발의 경우 운동량 방정식 및 난류 방정식의 대류항에 대한 차분 정확도의 증가가 반드시 예측성능을 개선하는 것이 아님을 확인하였다. 상기와 같은 결과는 CFD 우수사례 지침에서 고차 정확도의 대류항 처리를 권고한 것과 다른 것이다.

(3) 난류모델 민감도 평가 결과, 유동이 발달하는 관 다발의 초반부에서는 ω 계열 난류모델의 예측성능이 우수한 반면 유동이 발달된 관 다발의 중반부 이후부터는 ϵ 계열 난류모델의 예측성능이 우수함을 확인하였다.

(4) 관 다발의 마지막 열에서 예측된 유동 형태는 난류모델에 따라 상당한 차이를 나타내었다. 따라서 난류모델 예측성능의 타당성을 확인하기 위해 실험에서 상기 영역의 유동장을 측정할 필요가 있다.

(5) ANSYS CFX V.13을 관 다발 주위의 유동 해석 관련 인허가에 적용할 경우 격자, 대류항 차분 정확도, 난류모델 등의 선정시 CFD 우수사례 지침에서 권고하는 사항 이외에 추가적인 민감도 분석을 통해 보수적인 계산결과가 인허가에 사용될 필요가 있다.

후기

본 연구는 원자력안전위원회의 재정적 지원(과제명: 열수력 안전해석 규제검증기술 개발)으로 수행되었습니다. 또한 본 연구의 수행과 관련하여 많은 기술적 조언을 해주신 한국원자력안전기술원의 강동구 선임연구원께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Zukauskas, A., 1972, "Heat Transfer from Tubes in Cross-Flow," *Advanced in Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 93~160.
 (2) Paidoussis, M. P., 1983, "A Review of Flow-Induced Vibrations in Reactors and Reactor Components," *Nuclear Engineering and Design*,

- Vol. 74, pp. 31~60.
- (3) Simonin, O. and Barcouda, M., 1988, "Measurement and Prediction of Turbulent Flow Entering a Staggered Tube Bundle," *Proc. 4th Int. Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal.
- (4) Rollet-Miet, P., Laurence, D. and Ferziger, J., 1999, "LES and RANS of Turbulent Flow in Tube Bundles," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 241~254.
- (5) Menter, F., 2001, CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor Safety Applications, ECORA CONTRACT N° FIKS-CT-2001-00154.
- (6) Paul, S. S., Ormiston, S. J. and Tachie, M. F., 2008, "Experimental and Numerical Investigation of Turbulent Cross-Flow in a Staggered Tube Bundle," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 387~414.
- (7) Balabani, S., Bergeles, G., Burry, D. and Yianneskis, M., 1994, "Velocity Characteristics of the Cross-Flow over Tube Bundles," *Proc. 7th Int. Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Lisbon, Portugal.
- (8) ANSYS CFX, Version 13, ANSYS Inc.
- (9) ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2010, Version 13, ANSYS Inc.