

◎ 논문

비선형 $k-\epsilon$ 난류모델에 의한 봉다발의 삼각형 부수로내 난류유동 수치해석

명 현 국*

Simulation of Turbulent Flow in a Triangular Subchannel of a Bare Rod Bundle with Nonlinear $k-\epsilon$ Models

Hyon Kook Myong

Three nonlinear $k-\epsilon$ models with the wall function method are applied to the fully developed turbulent flow in a triangular subchannel of a bare rod bundle. Typical predicted quantities such as axial and secondary velocities, turbulent kinetic energy and wall shear stress are compared in details both qualitatively and quantitatively with both each other and experimental data. The nonlinear $k-\epsilon$ models by Speziale[1] and Myong and Kasagi[2] are found to be capable of predicting accurately noncircular duct flows involving turbulence-driven secondary motion. The nonlinear $k-\epsilon$ model by Shih et al.[3] adopted in a commercial code is found to be unable to predict accurately noncircular flows with the prediction level of secondary flows one order less than that of the experiment.

Key Words: Nonlinear $k-\epsilon$ model(비선형 $k-\epsilon$ 모델), Turbulence-driven secondary flow (난류로 야기되는 이차유동), Anisotropy (비등방성), Subchannel(부수로), Rod Bundle(봉다발), Simulation(수치해석)

1. 서 론

액체금속로(LMFBR)와 비등경수로(BWR) 등과 같은 원자로에 사용되는 핵연료 봉다발은 봉다발 사이에 형성된 삼각형 또는 사각형 배열형태를 가지는 부수로(sub-channel)를 통해 봉다발의 축방향으로 냉각재가 흐른다. 유동의 횡단면이 비원형 단면(noncircular duct)인 이 유동의 주된 특징은 충분히 발달된 유동의 경우에도 횡단면상에 난류의 비등방성에 의해 야기되는 이차

유동(secondary flow)이 존재한다는 것이다. 이 이차유동은 축방향 주류속도에 비해 1% 이하로 상대적으로 매우 작으나, 난류에너지를 재분배시키고, 주유동 속도에 영향을 주어 결과적으로 벽면전단응력 분포를 변화시키는 등 유동장 전반에 걸쳐 큰 영향을 미친다. 따라서, 이러한 이차유동에 관해 현재까지 많은 실험적 및 수치해석적 연구가 수행되어 왔으나, 대부분 사각형 덕트내 유동에 대한 것으로 핵연료 봉다발의 부수로내 유동에 대한 연구는 비교적 적다[4-17].

단순화된 봉다발(bare rod bundle)의 삼각형 부수로에 대해서 Trupp and Azad[11], Carajilescov and Todreas[12] 및 Bartzis and Todreas[13]는 실험 및 해석적으로 연구하였으

* 2003년 3월 17일 접수

* 정회원, 국민대 기계자동차공학부

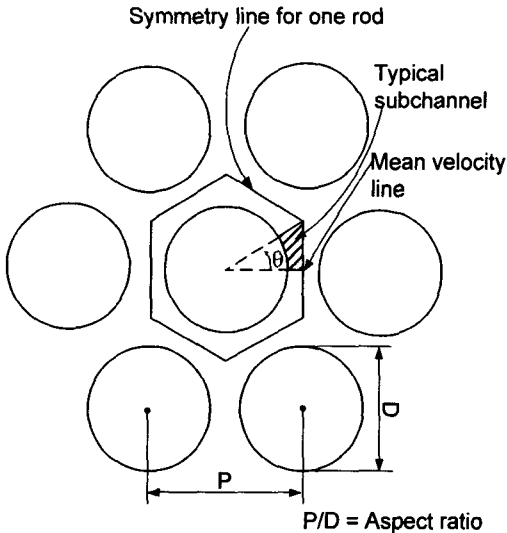


Fig. 1 Fuel bundle geometry with triangular array of bare rods.

며, Trupp and Aly[14], Yang and Chieng[15], Lee and Jang[16] 및 de Lemos and Assato[17]는 수치해석적으로 연구하였다. 이들 수치해석적 연구를 살펴보면 대부분의 연구가 원통좌표계를 사용하고[12-16], 난류의 비등방성을 고려하기 위해 경험에 의존하여 비등방성 계수(anisotropic factor)를 사용하던지[12, 14, 15], Launder and Ying[5]의 모델형태를 수정하여 사용하였다[13-15]. 특히, Yang and Chieng[15]은 선형(linear) $k-\epsilon$ 난류모델과 난류의 비등방성을 고려하기 위해 여러 가지 형태의 비등방성 계수(anisotropic factor)를 인위적으로 사용하였다. 한편, Lee and Jang[16]은 원통좌표계를 사용하고, 난류의 비등방성을 고려하기 위해 Speziale의 모델[1]을 채택한 레이놀즈수형 비선형(nonlinear) $k-\epsilon$ 모델을 처음으로 사용하여 해석하였다. 최근, de Lemos and Assato[17]는 일반좌표계를 사용하여 해석하였으며, 난류의 비등방성을 고려하기 위해 비선형 $k-\epsilon$ 모델로 Speziale의 모델[1] 및 Shih et al. [3]의 모델을 인위적으로 혼합하여 사용하였다.

한편, 현재 복잡한 형상을 가지는 유동장을 해석하기 위해 일반좌표계를 사용하는 상용코드가 널리 사용되고 있으나, 대부분의 상용코드는 난류의 등방성 가정에 기초한 선형(linear) 난류모

델을 채택하고 있어 비원형 단면을 가지는 봉다발의 부수로내에서의 난류유동과 같은 난류의 비등방성에 기인하여 발생하는 난류유동을 제대로 예측하지 못하고 있다. 최근, 난류의 비등방성을 고려한 비선형(nonlinear) 난류모델[3]을 도입시킨 상용코드[18]가 개발되어, 비원형 단면을 가지는 복잡한 난류유동 해석에 사용되고 있으나, 이 코드에 채택된 비선형 난류모델에 대한 정확한 평가가 아직 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 이러한 배경하에 가압경수로(PWR)에 사용되는 핵연료 봉다발을 단순화시킨 삼각형 부수로내 난류유동에 대한 수치해석을 일반좌표계를 사용하여 수행하고, 기존의 고레이놀즈수형 비선형 난류모델의 예측성능을 정량적으로 평가하고자한다

2. 수치해석방법

2.1 해석모델 및 비선형 난류모델

본 연구에서 대상으로 하는 해석모델은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 삼각형 단면을 가지는 부수로내의 난류유동이며, 해석의 편의상 완전히 발달된 난류유동의 경우만을 고려하기로 한다.

본 연구에서는 상호비교를 위한 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델로 현재 상용코드[18]에서 유일하게 채용하고 있는 Shih et al.의 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델[3](이하 SZL 모델), 기존연구에서 사용된 Speziale의 모델[1](SP 모델)과 정방형 덕트유동 해석에서 우수한 예측성능을 보인 Myong and Kasagi에 의해 제안된 비선형 모델[2, 9](MK 모델)을 대상으로 한다. 그러나 이들 모델들은 기본이 되는 k 및 ϵ 방정식의 모델형태도 조금씩 다르기 때문에, 본 연구에서는 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델에 포함된 레이놀즈응력과 변형율 사이의 관계인 비선형 난류모형에 초점을 맞추기 위해, 기본적인 k 및 ϵ 방정식의 모델형태로 표준 $k-\epsilon$ 난류모델의 (선형)모델방정식 및 모델상수 값을 사용하기로 한다.

일반적으로 벽함수를 사용하는 고레이놀즈수형 비선형 난류모형은 레이놀즈응력과 변형율 사이의 관계를 다음과 같이 비선형으로 표현할 수 있다[19].

$$\begin{aligned} \overline{\rho u_i u_j} &= \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \mu_t S_{ij} \\ &+ C_1 \mu_t \frac{k}{\epsilon} (S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} \delta_{ij}) \\ &+ C_2 \mu_t \frac{k}{\epsilon} (\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki}) \\ &+ C_3 \mu_t \frac{k}{\epsilon} (\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \delta_{ij}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad \Omega_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

참고로, 위의 식(1)에서 선형 난류모형은 우변의 처음 두 항만을 사용한다.

비선형 난류모형의 모델상수에 대해서 먼저 SZL 모델은 다음과 같은 복잡한 함수형태를 채용하고 있으며,

$$C_1 = \frac{0.75}{(1000 + S^3) C_\mu} \quad (4a)$$

$$C_2 = \frac{3.75}{(1000 + S^3) C_\mu} \quad (4b)$$

$$C_3 = \frac{4.75}{(1000 + S^3) C_\mu} \quad (4c)$$

$$C_\mu = \frac{2/3}{1.25 + S + 0.9\Omega} \quad (5)$$

$$S = \frac{k}{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}}, \quad \Omega = \frac{k}{\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (6)$$

SP 모델은 다음과 같은 모델상수 값을 가진다.

$$C_1 = -0.1512, \quad C_2 = 0.0, \quad C_3 = 0.0 \quad (7)$$

한편, MK 모델은 원래 저레이놀즈수형 난류 모델이나 고레이놀즈수형에 대해서는 벽면 근처

의 영향을 고려한 벽감쇄함수 및 추가항 들을 제외하면 식(1)로 표현되며, 다음과 같은 모델상수 값을 가진다.

$$C_1 = 0.275, \quad C_2 = 0.2375, \quad C_3 = 0.05 \quad (8)$$

2.2 수치해석방법

수치해석은 자체 개발한 MOSA3D코드[20]를 사용하여 수행하였다. 이 코드는 일반 상용 CFD 코드에서와 같이 유한체적법과 SIMPLE 해법에 기초하고 일반좌표계(경계밀착좌표계)와 정렬격자계를 채택하고 있다.

본 연구에서는 대칭성을 고려하여 Fig. 1에 나타난 삼각형 봉다발 부수로의 1/6만을 계산영역으로 설정하여, 부수로 중심선과 1/6 대칭선 및 부수로 틈새(gap) 경계선에서 각각 대칭경계조건을 사용하였으며, 봉 표면인 벽면경계에 대해서는 선형 난류모델에서 사용하는 벽함수를 그대로 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 완전히 발달된 유동을 경제적으로 처리하기 위해 축(주유동) 방향으로 주기경계조건을 부여하였다. 본 계산에서는 y (반경) 축 방향으로 24개의 비등간격 격자를, z (원주)축 방향으로 45개의 등간격 격자를 각각 사용하였으며, 대류향에 대한 도식으로 충분히 발달된 유동을 다루므로 편의상 하이브리드 도식(hybrid scheme)을 사용하였다. 참고로, 이하 비교·고찰하는 결과는 $P/D=1.127$ 인 경우로 작동유체가 상온 상압조건인 물이고, 평균 유속과 부수로 수력직경을 기준으로 계산된 Reynolds수는 27000이며, 이 경우 벽면과 인접한 격자의 무차원 벽면으로부터의 거리(y^+)는 15-19이다.

3. 결과 및 고찰

비선형 모델에 의한 예측성능을 비교하기 위해 축(주유동) 방향 속도 및 난류에너지의 등고선에 대한 실험결과[12]를 Fig. 2에, 선형모델인 표준 $k-\epsilon$ 모델의 예측결과를 Fig. 3에 각각 나타낸다. 선형모델의 결과는 측정된 속도분포에 비해 상대적으로 부수로 중앙의 속도는 높고, 좁은 유로(gap) 영역의 속도는 매우 낮은 속도를

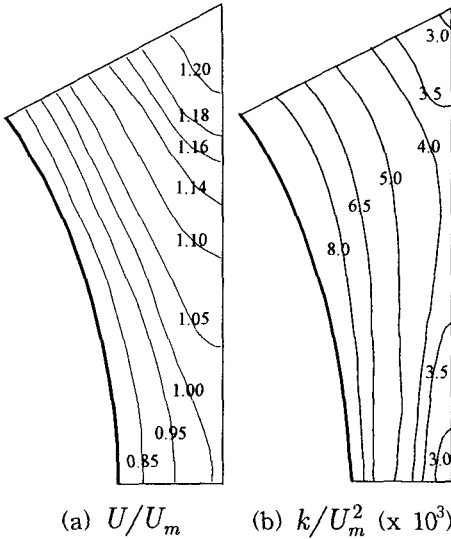


Fig. 2 Measured contour plots for axial velocity and turbulent kinetic energy [13].

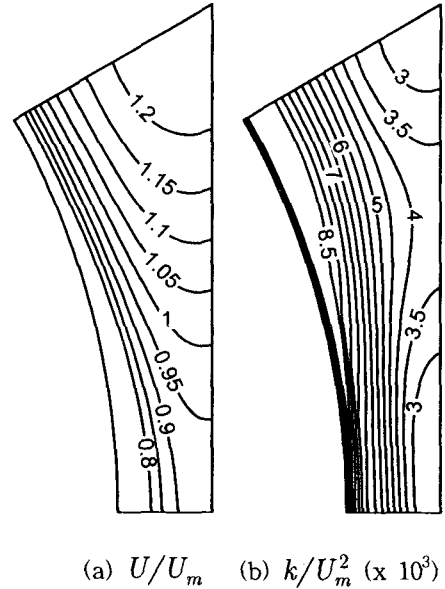


Fig. 4 Predicted contour plots for axial velocity and turbulent kinetic energy (SZL model).

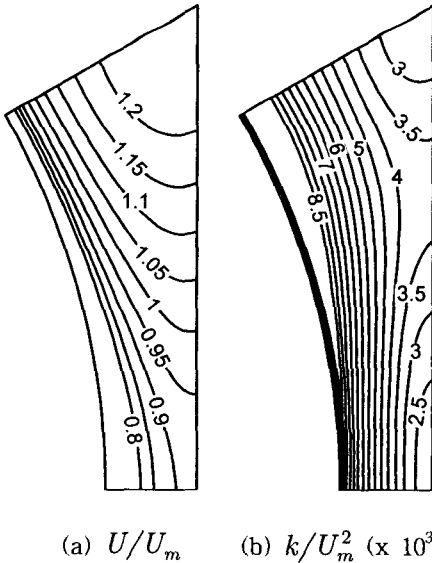


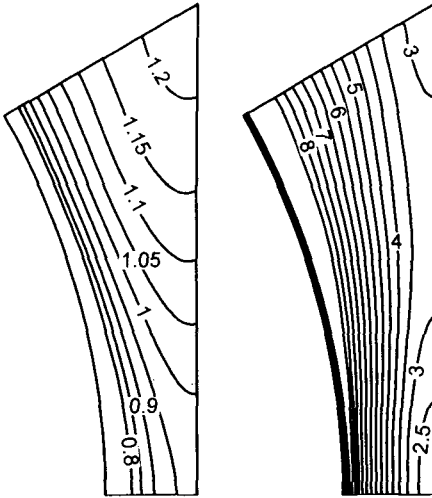
Fig. 3 Predicted contour plots for axial velocity and turbulent kinetic energy (Linear model).

나타내고 있다. 즉, 부수로 중앙으로부터 좁은 유로로의 속도변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 반면, 선형모델로 예측된 난류에너지는 실험결과와 유사한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 부수로 중앙과 좁은 유로 중앙에서 난류에너지는 최소가 되고 봉표면인 벽면에 가까울수록 증가하는 경향을 비교적 잘 보여주고 있다. 그러나 전반적으로 난류에너지를 다소 크게 예측하는

것을 알 수 있다.

Fig. 4은 상용코드에 도입된 SZL 모델에 의해 예측된 결과를 나타낸다. 예측결과를 보면 축방향 속도 및 난류에너지 모두 Fig. 3에 나타난 선형모델의 결과와 거의 유사할 정도로 이차유동에 의해 변형되는 속도 및 난류에너지 분포 양상을 전혀 나타내지 못하고 있음을 알 수 있다. 이것은 뒤에서 고찰하듯이 SZL 모델이 이차유동을 적절히 예측하지 못하기 때문이다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 MK 모델 및 SP 모델에 의해 예측된 결과를 각각 나타낸다. 예측 결과를 보면 두 모델이 거의 동등한 예측성능을 가짐을 알 수 있다. 즉, 두 모델은 이차유동에 의해 선형모델의 예측결과보다 부수로 중앙의 속도는 낮아지고 좁은 유로(gap) 영역의 속도는 높아지는 실험적 경향을 잘 나타내고 있으며, 정량적으로도 실험결과와 잘 일치하고 있다. 한편, 난류에너지에 대한 예측결과는 실험적 경향을 잘 나타내고 있으나, 정량적으로는 난류에너지를 다소 작게 예측하고 있다. 참고로, Fig. 5와 Fig. 6에서와 같이 MK 모델 과 SP 모델이 모델방정식에 사용되는 모델 상수는 약간 다르지만 동등한 정도의 예측성능을 나타내고 있는 것은 이차적인 수직응력에 대한 차 및 이차적인 레이놀즈 전단



(a) U/U_m (b) $k/U_m^2 (x 10^3)$

Fig. 5 Predicted contour plots for axial velocity and turbulent kinetic energy (MK model).

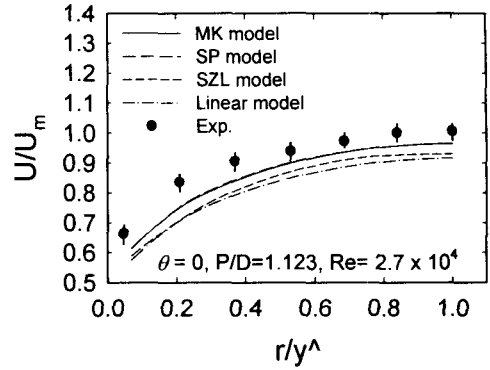


Fig. 7 Axial velocity distributions.

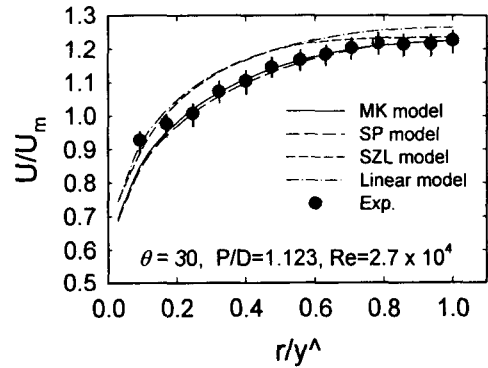
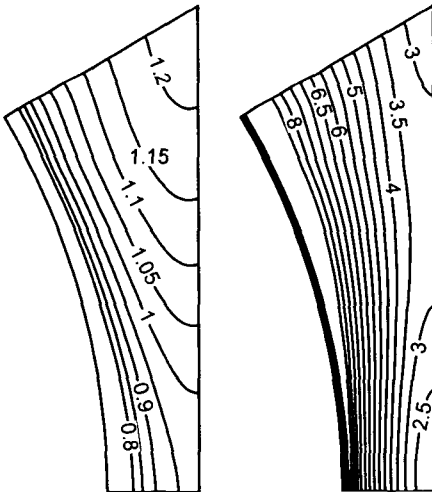


Fig. 8 Axial velocity distributions.



(a) U/U_m (b) $k/U_m^2 (x 10^3)$

Fig. 6 Predicted contour plots for axial velocity and turbulent kinetic energy (SP model).

응력 에 대한 항이 거의 일치[21]하기 때문에 서로 사료되며, 이 두 항이 정사각형 덕트유동에서와 같이 삼각형 부수로내 유동에서도 이차유동 생성에 중요한 역할을 하고 있음을 간접적으로 입증하고 있다.

여기서, 각 비선형 모델에 대한 예측성능을 보

다 명확히 비교하기 위해 Fig. 7과 Fig. 8에 $\theta=0$ 및 $\theta=30$ 에서의 반경방향으로의 축방향 속도분포를 실험결과[13]와 함께 각각 나타냈다. 참고로 실험결과에 불확실성 정도를 함께 표시하였으며, 두 그림에서 가로축 무차원변수에 사용된 r 은 봉 벽면으로부터 반경방향으로 관심점까지의 거리이고, y^{\wedge} 은 봉 벽면으로부터 반경방향으로 최대속도선까지의 거리다. 결과를 보면 SZL 모델은 속도분포가 부수로 중앙 영역에서만 이차유동에 의해 실험결과에 접근하나, 좁은 유로($\theta=0$) 영역을 포함해 대부분의 영역에서 선형모델과 거의 동등한 예측을 하고 있다. 반면, SP 모델과 MK 모델은 좁은 유로영역에서는 실험결과보다 다소 낮게 예측하고 있으나, 전반적으로 이차유동에 의한 속도변화를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 즉, 선형모델의 결과와 비교할 때 이차유동으로 인해 좁은 유로영역에서는 속도

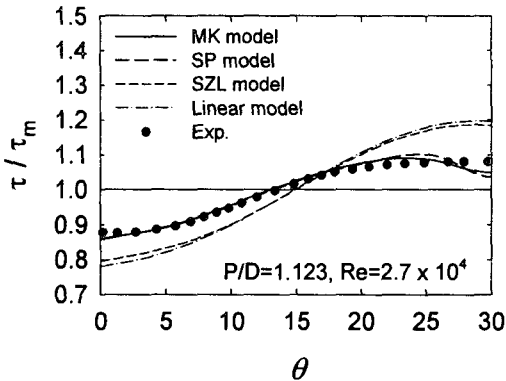


Fig. 9 Wall shear stress distribution.

가 증가되고, 부수로 중앙영역($\theta=30$)에서는 감소되는 실험적 경향을 잘 나타내고 있다. 한편, 좁은 유로 영역에서의 실험과의 차이는 실험값이 완전히 발달되지 않은 상태에서의 결과에 기인하는 것으로 사료된다. 실제로 Bartzis and Todreas[13]는 완전히 발달된 상태에서의 속도결과가 좁은 유로영역에서 Fig. 7에 나타낸 이전의 측정결과[12] 보다 다소 낮아진다고 보고하고 있으며, 이는 수치해석 결과와 더욱 근접함을 의미한다.

Fig. 9는 봉다발 표면에서의 국소 벽면전단응력의 예측결과를 실험결과[13]와 함께 나타내고 있다. 참고로 선형모델 결과도 함께 나타냈다. 상용코드에 도입된 SZL 모델은 이차유동 효과를 전혀 나타내지 않는 선형모델과 거의 비슷한 예측성능을 나타내고 있다. 즉, $\theta=0$ 부터 $\theta=30$ 까지 전단응력이 단조증가하고 있다. 반면, MK 및 SP 모델의 예측결과는 $\theta=30$ 부근에서 다소 차이를 나타내지만 전반적으로 실험결과와 정량적으로도 정성적으로도 매우 잘 일치하고 있다. 또한, MK 및 SP 모델의 예측결과는 선형모델의 결과에 비해 벽면전단응력이 평균화됨을 나타내고 있으며, 이 결과는 이차유동이 벽면전단응력의 평균화에 기여한다는 실험적 사실[11]을 입증하고 있다.

Fig. 10은 MK 모델 및 SZL 모델에 의해 예측된 이차유동 속도분포를 나타낸다. SP 모델의 결과는 MK 모델결과와 거의 같기 때문에 생략하였다. 동일한 레이놀즈수에서의 실험결과[12]는 실험의 부정확성으로 인해 이차유동의 벡터

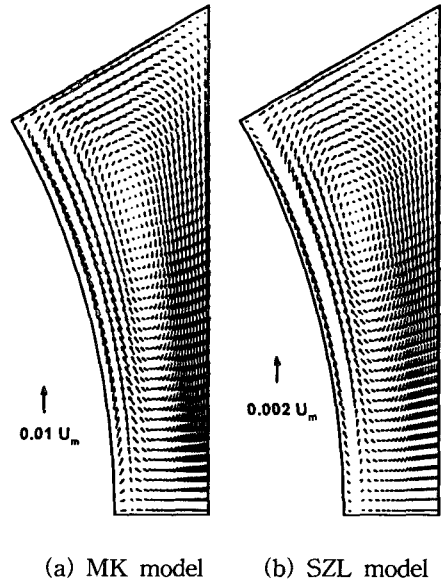


Fig. 10 Predicted vector plots for secondary flow.

플롯을 제시하지는 못하였지만, 난류유동의 비등방성으로 인해 부수로 중심에서 좁은 유로쪽으로 2차유동이 발생하며, 이차유동 속도크기의 최대값을 축방향 평균속도의 약 0.67 %로 보고하고 있다. 예측결과를 보면 두 모델이 정성적으로 유사한 이차유동의 분포 형태를 보여 주고 있으나, 정량적으로는 크게 차이를 나타내고 있다. 즉, MK 모델이 이차유동 속도크기의 최대값을 축방향 평균속도의 약 0.6 % 정도로 실험결과를 잘 예측하고 있는데 반해, SZL 모델은 0.08 %로 실험결과 및 MK 모델에 비해 한 차수 작게 이차유동을 예측하고 있다. 이와 같이 상용코드에 도입된 SZL 모델이 MK 모델 및 SP 모델에 비해 이차유동을 작게 예측하는 것은 이차유동 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있는 이차적인 수직응력에 대한 차 및 이차적인 레이놀즈 전단응력을 제대로 예측하지 못하기 때문으로, 결과적으로 SZL 모델은 이로 인해 이차유동을 예측하기는 하나, 정량적인 면에서 너무 작게 예측하여 앞에서 기술한 이차유동에 기인하여 생기는 축방향 속도 및 벽면전단응력 등 실험적으로 알려진 유동장의 변화를 제대로 예측할 수 없게 된다. 또한, 본 결과는 이 두 항이 정사각형 덕트유동[21]에서와 같이 삼각형 부수로내 유동에서도 이차유동 생성에 중요한 역할을 하고 있

음을 간접적으로 입증하고 있다.

한편, 삼각형 부수로내 유동에서의 이차유동 형태(이차유동 셀의 수)에 관해 많은 수치해석적 연구에서 현재까지 논란이 되고 있다. 즉, Carajilescov and Todreas[12] 및 de Lemos and Assato[17]는 두 개의 이차유동 셀이 존재한다고 보고하였으며, Trupp and Aly[14] 및 Yang and Chieng[15]은 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 하나의 이차유동 셀이 존재한다고 보고하였다. 현재까지 실험적으로 보고된 것이 없어 현 단계에서 정확히 입증하기는 어려우나, 참고로 본 연구를 수행하는 중 수치계산이 완전히 수렴되지 않았을 때, 2개의 이차유동 셀이 존재하다 완전히 수렴 되면 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 하나의 이차유동 셀만이 존재하는 것을 확인하였다. 따라서, 두 개의 이차유동 셀이 존재한다는 이전의 수치해석적 연구결과는 완전히 수렴되지 않은 상태에서의 결과라고 사료된다.

4. 결론

단순화한 핵연료 봉다발의 삼각형 형상을 가지는 부수로내의 완전히 발달된 난류유동을 일반좌표계를 사용하여 수치해석하고, 기존의 고레이놀즈수형 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델의 예측성능을 정량적으로 상호비교분석을 통해 평가하였다. 본 연구결과,

(1) MK 모델 및 SP 모델은 이차유동 및 이차유동에 기인하여 생기는 벽면전단응력, 축방향 속도, 난류에너지 등 실험적으로 알려진 유동장의 변화를 잘 예측하고 있음이 확인되었다.

(2) 상용코드에 도입된 비선형 난류모델인 SZL 모델은 정성적으로 이차유동을 예측하기는 하나, 정량적인 면에서 MK 모델, SP 모델 및 실험결과에 비해 한 차수 이상 작게 예측하여 이차유동에 기인하여 생기는 실험적으로 알려진 유동장의 변화를 제대로 예측할 수 없음이 명확하게 확인되었다.

(3) 봉다발의 삼각형 형상을 가지는 부수로내의 난류유동과 같이 복잡한 형상을 가지는 유동장의 난류의 비등방성에 의해 야기되는 이차유동을 일반좌표계를 사용하여 적절히 해석할 수 있는 수치해석 방법이 확립되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 국책연구개발사업 (공학용해석S/W기술개발사업, 과제번호:M1-0128-00-0002) 및 2002년도 원자력중장기사업(과제번호: M2020402003-02A0102-00312)에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Speziale, C.G., "On Nonlinear $k-l$ and $k-\epsilon$ Models of Turbulence," J. Fluid Mech., Vol.176, (1987), p.459~475.
- [2] Myong, H. K. and Kasagi, N., "Prediction of Anisotropy of the Near-Wall Turbulence with an Anisotropic Low-Reynolds-Number $k-\epsilon$ Turbulence Model," Trans. ASME J. Fluids Engineering, Vol.112, (1990), p.521~524.
- [3] Shih, T. H., Zhu, J. and Lumley, J. L., "A Realizable Reynolds Stress Algebraic Equation Model," NASA TM-105993, (1993).
- [4] Brundrett, E. and Baines, W. D., "The Production and Diffusion of Vorticity in Duct Flow," J. Fluid Mech., Vol.19, (1964), p.375~394.
- [5] Launder, B. E. and Ying, W. M., "Prediction of Flow and Heat Transfer in Ducts of Square Cross Section," Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol.187, (1973), pp.455~461.
- [6] Melling, A. and Whitelaw, J. H., "Turbulent Flow in a Rectangular Duct," J. Fluid Mech., Vol.78, (1976), p.289~315.
- [7] Gessner, F. B. and Emery, A. F., "The Numerical Prediction of Developing Turbulent Flow in Rectangular Ducts," Trans. ASME. J. Fluids Engineering, Vol.103, (1981), p. 445~455.
- [8] Demuren, A. O. and Rodi, W., "Calculation of Turbulent Driven Secondary Motion in Non-Circular Ducts," J. Fluid Mech.,

- Vol.140, (1984), p.189~222.
- [9] Myong, H. K. and Kobayashi, T., "Prediction of Three-Dimensional Developing Turbulent Flow in a Square Duct with an Anisotropic Low-Reynolds-Number $k-\epsilon$ Model," Trans. ASME J. Fluids Engineering, Vol.113, (1991), p.608~615.
- [10] Mompean, G., "Numerical Simulation of a Turbulent Flow near a Right-Angled Corner using the Speziale Non-Linear Model with RNG $k-\epsilon$ Equations," Computers & Fluids, Vol.27, No.7, (1998), p.847~859.
- [11] Trupp, A.C. and Azad, R.S., "The Structure of Turbulent Flow in Triangular Array Rod Bundles," Nuclear Engineering and Design, Vol.32, No.1, (1975), p.47~84.
- [12] Carajilescov, P. and Todreas, N.E., "Experimental and Analytical Study of Axial Turbulent Flows in an Interior Subchannel of a Bare Rod Bundle," Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol.98, (1976), p.262~268.
- [13] Bartzis, J.G. and Todreas, N.E., "Turbulence Modeling of Axial Flow in a Bare Rod Bundle," Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.101, (1979), p.628~634.
- [14] Trupp, A.C. and Aly, A.M.M., "Predicted Secondary Flows in Triangular Array Rod Bundles," Trans. ASME J. Fluids Engineering, Vol.101, (1979), p.354~363.
- [15] Yang, A.S. and Chieng, C.C., "Turbulent Heat and Momentum Transports in an Infinite Rod Array," Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.109, (1987), p.599~605.
- [16] Lee, K.B. and Jang, H.C., "A Numerical Prediction on the Turbulent Flow in Closely Spaced Bare Rod Arrays by a Nonlinear $k-\epsilon$ Model," Nuclear Engineering and Design, Vol.172, (1997), p.351~357.
- [17] de Lemos, M.J.S. and Assato, M., "Simulation of Axial Flow in a Bare Rod Bundle using a Non-linear Turbulence Model with High Reynolds Approximation," Proc. ICONE10(10th Int. Conf. on Nuclear Eng.), ICONE10-22300, Arlington, VA, Apr. 14-18, (2002).
- [18] STAR-CD, Methodology Manual, Version 3.10, Computational Dynamics Ltd., (1999), p.2.1~2.14.
- [19] Craft, T. J., Launder, B. E. and Suga, K., "Development and Application of a Cubic Eddy-Viscosity Model of Turbulence," Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.17, (1996), p.108~115.
- [20] Myong, H.K., "Development of 3-D Convective Heat Transfer Analysis Program using Structured Grid System," (in Korean) Proc. KAMES 2002 Joint Symp. (KSME Part), (2002), p. 2614~2619.
- [21] Myong, H.K., "Evaluation of Nonlinear $k-\epsilon$ Models on Prediction Performance of Turbulence-Driven Secondary Flows," (in Korean) submitted to Trans. KSME (2003).