

비선형 저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델에 따른 정사각형 덕트내 완전 발달된 난류유동 예측

명 현 국*

(2002년 12월 26일 접수, 2003년 3월 26일 심사완료)

Prediction of Fully Developed Turbulent Flow in a Square Duct with Nonlinear Low-Reynolds-Number $k-\epsilon$ Models

Hyon Kook, Myong

Key Words: Nonlinear $k-\epsilon$ Model(비선형 $k-\epsilon$ 모델), Turbulence-Driven Secondary Flow (난류로 야기되는 이차유동), Anisotropy (비등방성), Low-Reynolds-Number Model(저레이놀즈수 모델), Prediction(예측)

Abstract

Fully developed turbulent flow in a square duct is numerically predicted with two nonlinear low-Reynolds-number $k-\epsilon$ models. Typical predicted quantities such as axial and secondary velocities, turbulent kinetic energy and Reynolds stresses are compared in detail with each other. It is found that the nonlinear low-Reynolds-number $k-\epsilon$ model adopted in a commercial code is unable to predict accurately duct flows involving turbulence-driven secondary motion with the prediction level of secondary flows one order less than that of the experiment.

1. 서론

비원형 단면(noncircular duct)을 가지는 덕트내에서의 난류유동은 공학적으로 중요한 열교환기, 공기조화시스템, 연소챔버 및 원자로의 냉각채널 등에서 나타나며, 이 유동의 주된 특징은 충분히 발달된 유동의 경우에도 횡단면상에 이차유동(secondary flow)이 존재한다는 것이다. 이 이차유동은 난류에 의해 야기되며 축방향 주류속도에 비해 1% 이하로 상대적으로 매우 작으나, 난류에 에너지를 재분배시키고, 주유동 속도에 영향을 미쳐 결과적으로 벽면전단응력에 영향을 미치는 등 유동장에 큰 영향을 미친다. 따라서 현재까지 많은 실험적 및 수치해석적 연구가 수행되어 왔

다.^(1~7)

한편, 현재 공학적으로 중요한 복잡한 형상을 가지는 물체 주위 및 내부의 난류유동예측을 위해 일반좌표계를 사용하는 상용코드가 널리 사용되고 있으나, 대부분의 상용코드는 난류모델로 난류의 등방성 가정에 기초한 선형(linear) 난류모델을 채택하고 있어 난류의 비등방성에 기인하여 발생하는 비원형 단면을 가지는 덕트내에서의 난류유동을 제대로 예측하지 못하고 있었다. 최근, 난류의 비등방성을 고려한 비선형(nonlinear) 난류모델을 도입시킨 상용코드(STAR-CD)⁽⁸⁾가 개발되어, 비원형 단면을 가지는 복잡한 난류유동 해석에 사용되고 있으나, 이 비선형 난류모델에 대한 정확한 평가가 아직 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구는 이러한 배경하에 정사각형 형상을 가지는 덕트내의 난류유동을 대상으로 하여, 기존에 우수한 예측성능을 나타낸 비선형 난류모델과의 비교분석을 통해, 현재 상용코드에 도입된

* 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : myong@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4714 FAX : (02)910-4839

비선형 난류모델의 예측성능을 정량적으로 평가하고, 또한 향후 비선형 난류모델의 개선방향을 위한 데이터베이스를 구축하고자 한다.

2. 수치해석방법

2.1 해석모델 및 비선형난류모델

본 연구에서 대상으로 하는 해석모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정사각형 단면을 가지는 덕트 내의 난류유동으로, 형상이 단순하고 실험결과가 많이 있어 비선형 난류모델을 정량적으로 평가하기에 적절하다. 본 연구에서는 해석의 편의상 완전히 발달된 난류유동의 경우만을 고려하기로 한다.

또한, 본 연구에서 대상으로 하는 비선형 난류모델은 현재 저자가 알고 있는 한 상용코드⁽⁸⁾에서 유일하게 채용하고 있는 저레이놀즈수형 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델(이하 STAR-CD 모델)과 저자⁽⁹⁾에 의해 제안된 저레이놀즈수형 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델(이하 Myong-Kasagi 모델)이다. 이 비선형 모델들은 기본이 되는 저레이놀즈수형 선형 $k-\epsilon$ 모델형태 및 모델상수도 각각 다소 다르나 예측성능은 유사하므로, 여기서는 본 논문에서 주된 관심사항인 이차유동 예측성능을 높이기 위해 각 모델에서 채택하고 있는 비선형 모형을 중심으로 간략하게 소개한다.

일반적으로 비선형 모형은 레이놀즈응력과 변형률 사이의 관계를 다음과 같이 비선형으로 표현할 수 있다.

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

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

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

위의 식 (1)에서 선형 난류모형은 우변의 처음 두 항만을 사용한다. 먼저 STAR-CD 모델은 기본이 되는 저레이놀즈수형 선형 $k-\epsilon$ 모델형태로 Lien 등⁽¹⁰⁾의 모델형태를 채용하고 있으며, 비

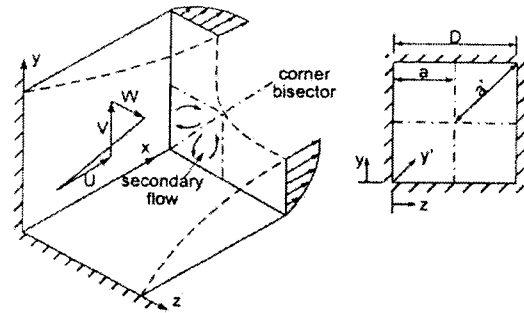


Fig. 1 Coordinate system and pertinent variables in a straight square duct

선형 난류모형의 모델상수에 대해서 아래와 같이 Shih 등⁽¹¹⁾의 복잡한 함수형태를 가진 모델상수를 채용하고 있다.

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

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

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

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

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

한편, Myong-Kasagi 모델⁽⁹⁾은 원래 식 (1)과 다른 형태로 제안되었으나, 식 (1)로 표현하면 다음과 같은 모델상수 값을 가지며,

$$C_1 = 0.275, C_2 = 0.2375, C_3 = 0.05 \quad (7)$$

STAR-CD 모델과 달리 벽면 근처의 벽면점근거동을 만족시키기 위해 추가항을 포함하고 있다. 이 두 모델에 대한 보다 상세한 사항은 지면관계상 참고문헌^(8,9)으로 넘기고, 여기서는 두 모델의 특징만을 기술한다. 먼저, STAR-CD 모형은 난류모델 방정식의 해가 어떤 조건하에서도 만족시켜야 할 모든 난류수직응력이 양의 값을 가져야 하며, 난류 변동량들 사이에 Schwarz의 부등식이 성립되어야 하는 물리적 및 수학적인 원리인 실현성(realizability)을 만족하고 있으나, 아직 공학적인 문제에 적용되어 정량적으로 정확한 평가가 이루어져 있지 않다. 반면, Myong-Kasagi 모델은 실현성을 항상 만족하고 있지 못해, 복잡한 형상

을 가지는 유동예측을 위해서는 개량의 여지가 있으나, 본 연구에서 대상으로 하는 정사각형 형상을 가지는 덕트내의 유동을 매우 뛰어나게 예측하는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾

2.2 수치해석방법

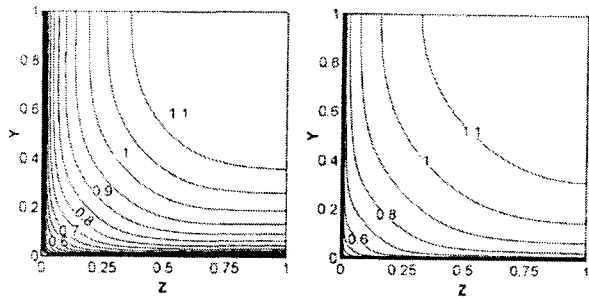
수치해석은 자체 개발한 MOSA3D코드⁽¹²⁾를 사용하여 수행하였다. 이 코드는 유한체적법과 SIMPLE 해법에 기초하고 일반좌표계(경계밀착좌표계)와 정렬격자계를 채택하고 있으며, 본 연구를 통해 축(주유동) 방향으로 1~3개의 셀층만이 요구되는 완전히 발달된 유동을 경제적으로 처리할 수 있는 수치해석방법을 코드에 도입하였다. 이 수치해석방법은 입구면상에 압력경계조건을, 출구면에 명시된 유동출구조건을 부과하는 방법으로 본 연구에서와 같이 완전히 발달된 유동을 해석하는데 매우 경제적인 방법으로 일부 상용코드에서도 채택되고 있다.

본 연구에서는 대칭성을 고려하여 Fig. 1에 나타난 정사각형 단면의 1/4만을 대상으로 하였다. 또한, y 및 z 축 방향으로 각각 41개의 격자를 사용하고, 저레이놀즈수 모델을 사용하므로 벽면으로부터 첫 번째 격자에서의 y^+ 값이 1 정도가 되도록 벽면 근처에 조밀한 비등간격 격자계를 사용하였다. 대류항에 대한 도식으로는 하이브리드 도식 (hybrid scheme)을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 기본적으로 타원형 미분방정식을 푸는 방법인 MOSA3D 코드의 적합성은 동일한 유동 조건하에서 수행한 상용코드인 STAR-CD의 결과 및 포물선형 미분방정식을 푸는 방법으로 계산된 이전 연구결과⁽⁶⁾와의 비교분석을 통해 확인되었기에, 본 논문에서는 덕트 폭 및 축방향 평균속도에 기초한 레이놀즈수 Re 가 65000인 경우에 대한 결과만을 고찰하기로 한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 완전히 발달된 난류유동에 대한 덕트의 축방향 속도의 등고선 예측결과를 보여주고 있다. 결과를 보면 Myong-Kasagi 모델은 코너쪽으로 향한 이차유동에 기인하여 등고선이 코너쪽을 향해 만곡된 형상 및 속도구배가 가장 심한 부분이 코너와 대칭면 사이에 나타나는 실험적으



(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 2 Contours of axial velocity U/U_b

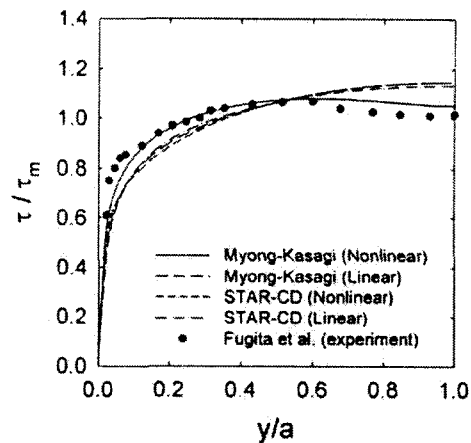


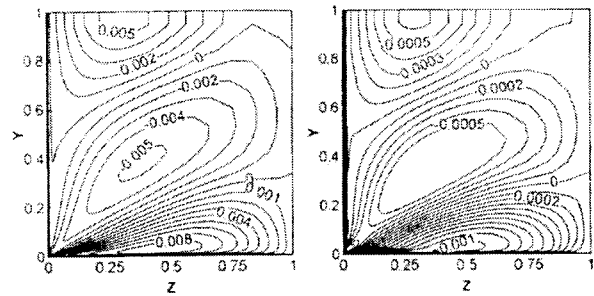
Fig. 3 Local wall shear stress distributions for fully-developed flow in a square duct

로 잘 알려진 사실^(1,3,13)을 명확하게 보여 주고 있다. 반면, STAR-CD 모델은 이러한 경향을 전혀 나타내고 있지 않으며, 난류의 비등방성을 전혀 고려하지 않는 선형(등방) 모델의 결과(그림 생략)와 거의 유사한 분포를 나타내고 있다. 이것은 STAR-CD 모델이 비등방 효과를 적절히 재현하고 있지 않으며, 따라서 이로 인한 이차속도도 제대로 예측할 수 없음을 의미한다.

Fig. 3은 완전히 발달된 난류유동에 대한 덕트 주변길이에 따른 국소 벽면전단응력의 예측결과를 실험결과⁽¹³⁾와 함께 나타내고 있다. 또한, 참고로 두 모델의 선형모델 결과도 함께 나타냈다. 실험결과는 벽면 부근에서 코너쪽으로 향하는 이차유동에 기인하여 벽면전단응력이 대칭면(양쪽 벽면의 중심)으로부터 코너쪽을 향해 상승하여 코너와 대칭면 중간 지점에서 최대값을 가진 후,

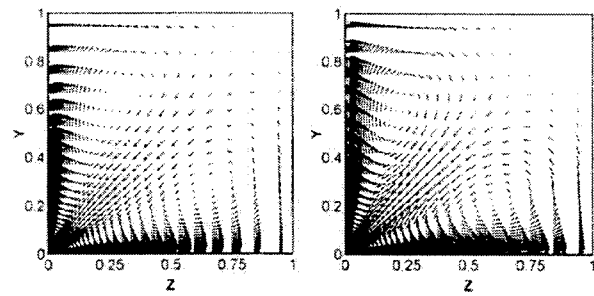
코너부근에서 급격히 떨어져 코너에서 0 값을 가짐을 보여주고 있다. 이 실험결과는 벽면전단응력이 벽면근방에서의 축방향 속도구배에 비례하는 것을 고려하면, 축방향 속도의 등고선이 벽면근방에서 코너쪽을 향해 만곡된 형상을 가지고 속도구배가 가장 심한 영역이 코너와 대칭면 사이에 나타나는 것을 의미하며 이것은 전술한 바와 같이 축방향 속도분포에 대한 잘 알려진 실험적 사실과도 일치한다. 먼저, 비등방성 효과를 전혀 고려하지 않는 두 선형모델의 예측결과를 보면 실험결과와는 달리 코너에서부터 상승하여 양쪽 벽면의 중심인 대칭면에서 최대가 되는 예측결과를 보여주고 있다. 이것은 선형모델이 이차유동을 전혀 예측하지 못하기 때문이며, 실험결과는 선형모델의 예측결과에 비해 이차유동에 기인하여 벽면전단응력의 평균화를 명확히 보여주고 있다. 한편, 비등방성 효과를 고려한 STAR-CD 비선형 모델도 이러한 실험적 결과물 거의 반영시키지 못하고 선형모델과 유사한 예측결과를 보여주고 있다. 반면, Myong-Kasagi의 비선형 모델은 실험적으로 알려진 특징을 명확하게 예측하고 있으며, 정량적으로도 실험결과와 상당히 잘 일치하고 있다. 따라서, Fig. 2와 Fig. 3의 결과로부터 Myong-Kasagi의 비선형 모델은 비등방성 효과를 적절하게 나타내고 있어, 결과적으로 후술하는 바와 같이 이차유동을 제대로 예측할 것으로 예상된다. STAR-CD 비선형 모델은 비등방성 효과를 나타내고는 있으나 효과가 상당히 미약하여, 결과적으로 이차유동을 제대로 예측하지 못함을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 정사각형 단면상에 나타나는 y 방향 이차유동 속도의 등고선 예측결과를 나타낸다. 참고로, 비슷한 레이놀즈수에서의 실험결과⁽⁶⁾는 이차유동 속도크기의 최대값을 축방향 평균속도의 약 0.9%로 보고하고 있다. 두 비선형 모델의 예측결과를 보면 두 모델이 정성적으로는 유사한 경향을 나타내고 있으나, 정량적으로는 상당한 차이를 나타내고 있다. 즉, Myong-Kasagi 모델이 이차유동 속도크기의 최대값을 축방향 평균속도의 약 0.5% 정도로 실험결과보다 다소 작게 예측하고 있다. 반면, STAR-CD 모델은 0.05%로, 전체적으로 Myong-Kasagi 모델 및 실험결과에 비해 한 차수이상 작게 이차유동을 예측하고 있다. 이것은 전술한 바와 같이 STAR-CD 모델에서 채



(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 4 Contours of secondary velocity V/U_b

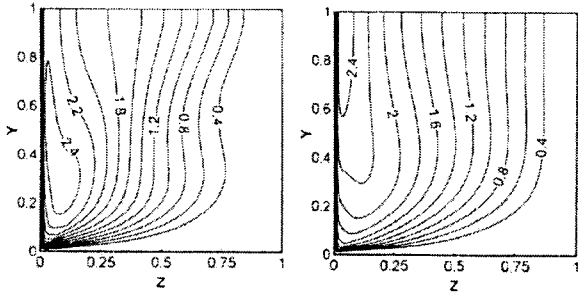


(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 5 Secondary flow vectors (the vector scale of (b) is multiplied by 10 in comparison with that of (a))

택하고 있는 비선형 모델이 비등방 효과를 적절히 재현하고 있지 않기 때문으로, 결과적으로 STAR-CD 모델은 Fig. 2와 Fig. 3에서 살펴 본바와 같이 이차유동에 기인하여 크게 변화되는 축방향 속도 분포 및 벽면전단응력의 실험적 사실을 제대로 예측하지 못하고 있다.

Fig. 5는 예측된 이차유동 속도벡터를 나타내고 있다. 두 모델이 정성적으로 유사한 이차유동의 분포 형태를 보여 주고 있으나, 정량적으로는 크게 차이를 나타내고 있다. 즉, Fig. 4(b)에 나타난 STAR-CD 모델 결과는 벡터 그림을 명확히 보여주기 위해 스케일을 10배로 확대시킨 것으로, STAR-CD 모델이 Fig. 4(a)에 나타난 Myong-Kasagi 모델에 비해 한 차수 작게 이차유동을 예측하고 있음을 나타내고 있다. 또한, STAR-CD 모델은 중심 영역에 비해 벽면 근방에서 상대적으로 큰 불합리한 이차유동 분포를 나타내며, 이차유동 중심이 Myong-Kasagi 모델에 비해 다소



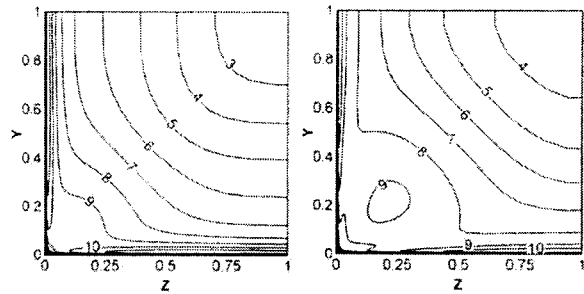
(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 6 Contours of turbulent shear stress $-\overline{uw}/U_b^2 (x 10^3)$

벽면 근방 쪽에 위치한다. 결과적으로, STAR-CD 모델은 이차유동을 예측하기는 하나, 정량적인 면에서 너무 작게 예측하여 앞에서 기술한 이차유동에 기인하여 생기는 축방향 속도, 벽면전단응력 및 뒤에서 비교분석할 레이놀즈응력 등 실험적으로 알려진 유동장의 변화를 제대로 예측할 수 없음을 예상할 수 있다.

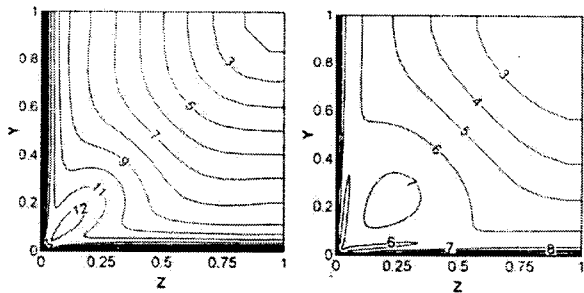
Fig. 6은 난류 전단응력 \overline{uw} 의 분포를 나타내고 있다. Myong-Kasagi 모델은 이차유동으로 인해 코너와 대칭면 사이에서 심하게 만곡되고, 최대 전단응력이 대칭면에서 나타나지 않고 코너쪽으로 이동하는 실험적으로 알려진 사실^(1,13)을 잘 보여주고 있다. 반면, STAR-CD 모델은 전반적으로 선형모델의 결과(그림 생략)와 유사하게 대칭면에서 최대 전단응력을 가지며, 이차유동에 기인되어 변화하는 전단응력 분포를 제대로 예측하고 있지 못하고 있다. 이것은 앞에서 살펴 본 바와 같이 STAR-CD 모델이 이차유동을 정량적으로 매우 작게 예측하고 있기 때문이다.

Fig. 7은 예측된 난류에너지의 등고선을 나타내고 있다. 실험결과^(1,3)에 따르면 난류에너지 등고선이 코너쪽을 향해 심하게 만곡된 형상을 나타내고 있다고 보고하고 있다. 예측결과를 보면 Myong-Kasagi 모델은 등고선이 코너쪽을 향해 만곡된 형상을 나타내고는 있으나, 그 정도가 실험적 사실에 비해 다소 약하다. 그러나, 코너 및 벽면 근방에서 상대적으로 수직응력이 높게 나타난다는 실험적 사실을 명확하게 보여주고 있다. 반면, STAR-CD 모델은 특히 벽면을 제외한 영역에서 난류에너지의 등고선이 중심쪽을 향하는 등 실험적 사실을 전혀 반영시키고 있지 못하며,



(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 7 Contours of turbulent kinetic energy $k/U_b^2 (x 10^3)$

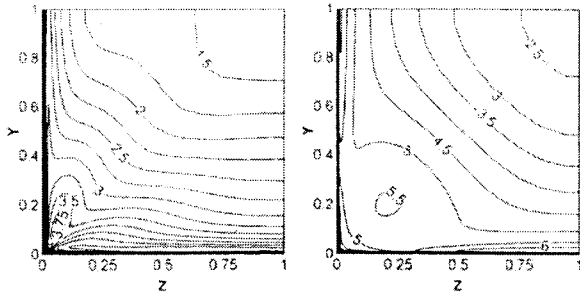


(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 8 Contours of turbulent normal stress $\overline{u^2}/U_b^2 (x 10^3)$

선형 모델의 결과(그림 생략)와 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 8은 축방향의 수직응력 등고선을 나타내고 있다. 실험결과^(1,3,13)에 따르면 이 수직응력 등고선이 난류에너지와 유사하게 코너쪽을 향해 심하게 만곡된 형상을 나타내고 있으며, 축방향 수직응력의 강도는 난류에너지 보다 높다고 보고하고 있다. 예측결과를 보면 Myong-Kasagi 모델은 난류에너지에 대한 Fig. 7의 등고선과 유사하게 코너 및 벽면 근방에서 상대적으로 수직응력이 높게 나타나고, 응력의 강도가 난류에너지 보다 높다는 실험적 사실을 명확하게 보여주고 있으며 등고선이 코너쪽을 향해 만곡된 형상을 나타내고는 있으나, 그 정도는 실험적 사실에 비해 상당히 약하다. 반면, STAR-CD 모델은 벽면을 제외한 영역에서 축방향 수직응력의 등고선이 중심쪽을 향하고, 응력의 강도도 Fig. 7(b)에 나타낸 난류에너지에 비해 도리어 낮은 예측 결과를 보이



(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

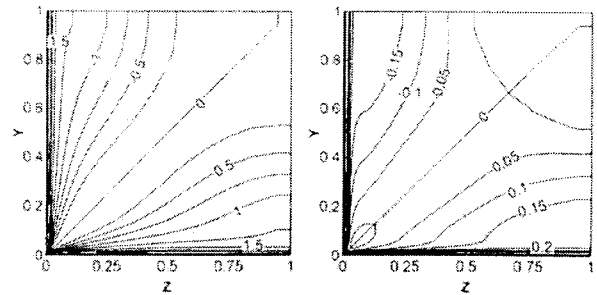
Fig. 9 Contours of turbulent normal stress

$$\overline{w^2}/U_b^2 (x 10^3)$$

는 등 실험적 사실을 전혀 반영시키고 있지 못하며, 선형 모델의 결과(그림 생략)와 유사한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 9는 z 방향의 수직응력 분포를 나타내고 있다. 실험결과^(3,5,13)에 따르면 이 수직 응력은 이차유동으로 인해 상당히 비대칭적인 형상을 나타내고 있으며, 난류강도도 크게 작아진다고 보고되어 있다. 예측 결과를 보면 Myong-Kasagi 모델은 이러한 실험적 사실을 비교적 잘 반영하고 있는데 비해, STAR-CD 모델은 비대칭성이 매우 약해 선형모델에서 얻어지는 대칭에 가까운 분포를 보여주고 있으며, 난류강도도 상대적으로 크게 떨어지지 않고 있다.

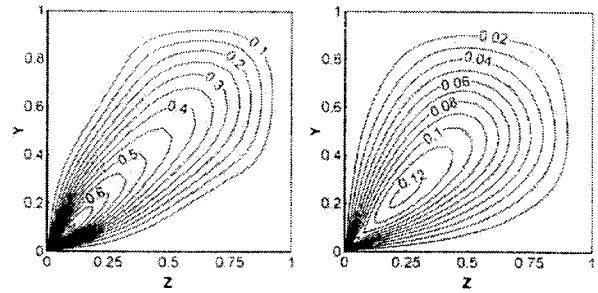
끝으로, 일반적으로 이차유동 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 Perkins⁽¹⁴⁾에 의해 입증된 정사각형 단면상의 수직응력의 차 $\overline{w^2} - \overline{v^2}$ 및 레이놀즈 전단응력 \overline{vw} 의 등고선을 Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타내었다. 두 모델이 정성적으로 유사한 형상을 예측하고 있으나, 정량적으로는 크게 차이를 나타내고 있다. 즉, Myong-Kasagi 모델에 비해 STAR-CD 모델은 $\overline{w^2} - \overline{v^2}$ 에 대해서는 한 차수 작게, \overline{vw} 에 대해서는 약 1/5 정도 작게 예측하고 있다. Myong-Kasagi 모델의 결과가 정량적으로 실험결과⁽¹⁾와 거의 비슷한 점을 고려하면, STAR-CD 모델은 이차유동을 발생시키는 주된 역할을 하는 단면상의 수직응력의 차 및 레이놀즈 전단응력을 상대적으로 작게 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 STAR-CD 모델은 결과적으로 Fig. 5에서 보는 바와 같이 이차유동을 예측하기는 하나, 정량적인 면에서 매우



(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 10 Anisotropy between turbulent normal stress

$$\text{components } (\overline{w^2} - \overline{v^2})/U_b^2 (x 10^3)$$



(a) Myong-Kasagi model (b) STAR-CD model

Fig. 11 Contours of turbulent shear stress

$$-\overline{vw}/U_b^2 (x 10^3)$$

작게 예측하여 앞에서 고찰한 바와 같이 이차유동에 기인하여 생기는 축방향 속도 및 벽면전단응력 등을 포함한 유동장의 변화를 제대로 예측하지 못하고 있다.

4. 결론

정사각형 형상을 가지는 덕트내의 완전히 발달된 난류유동을 대상으로 하여, 기존에 우수한 예측성능을 나타낸 Myong-Kasagi⁽⁹⁾의 저레이놀즈수형 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델과 현재 상용코드⁽⁸⁾에 도입된 저레이놀즈수형 비선형 $k-\epsilon$ 난류모델의 예측성능을 정량적으로 상호비교분석을 통해 평가하였다. 또한 축방향 속도, 단면상의 이차속도, 레이놀즈응력 등에 대한 등고선 결과를 제시하여 향후 비선형 난류모델의 개선을 위한 데이터베이스를 구축하였다.

본 연구결과, 축(주유동) 방향으로 1~3개의 셀 층만이 요구되는 완전히 발달된 유동을 경제적으로 처리할 수 있는 수치해석방법이 확립되었으며, 상용코드에 도입된 비선형난류모델은 정성적으로 이차유동을 예측하기는 하나, 정량적인 면에서 Myong-Kasagi 모델 및 실험결과에 비해 한 차수 이상 작게 예측하여 이차유동에 기인하여 생기는 벽면전단응력, 축방향 속도, 레이놀즈응력 등 실험적으로 알려진 유동장의 변화를 제대로 예측할 수 없음이 명확하게 확인되었다.

향후 Myong-Kasagi 모델을 복잡한 형상을 가지는 유동예측을 위해서 실현성을 항상 만족하도록 개량할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 국책연구개발사업(공학용해석 S/W 기술개발사업, 과제번호: M1-0128-00-0002) 및 2002년도 원자력중장기사업(과제번호: M2020402003-02A0102-00312)에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Brundrett, E. and Baines, W. D., 1964, "The Production and Diffusion of Vorticity in Duct Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 375~394.
- (2) Launder, B. E. and Ying, W. M., 1973, "Prediction of Flow and Heat Transfer in Ducts of Square Cross Section," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 187, pp. 455~461.
- (3) Melling, A. and Whitelaw, J. H., 1976, "Turbulent Flow in a Rectangular Duct," *J. Fluid Mech.*, Vol. 78, pp. 289~315.
- (4) Demuren, A. O. and Rodi, W., 1984, "Calculation of Turbulent Driven Secondary Motion in Non-Circular Ducts," *J. Fluid Mech.*, Vol. 140, pp. 189~222.
- (5) Gessner, F. B., 1982, "Corner Flow (Secondary Flow of the Second Kind)," in Kline et al. (eds.), *Proc. 1980-1981 AFORS-HTTM Stanford Conf. on Complex Turbulent Flows*, Stanford University.
- (6) Myong, H. K. and Kobayashi, T., 1991, "Prediction of Three-Dimensional Developing Turbulent Flow in a Square Duct with an Anisotropic Low-Reynolds-Number $k-\epsilon$ Model," *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 113, pp. 608~615.
- (7) Craft, T. J., Launder, B. E. and Suga, K., 1996, "Development and Application of a Cubic Eddy-Viscosity Model of Turbulence," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 17, pp. 108-115.
- (8) STAR-CD, 1999, *Methodology Manual*, Version 3.10, Computational Dynamics Ltd., pp. 2.1~2.14.
- (9) Myong, H. K. and Kasagi, N., 1990, "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, pp. 521~524.
- (10) Lien, F. S., Chen, W. L. and Leschziner, M. A., 1996, "Low-Reynolds-Number Eddy-Viscosity Modelling based on Non-Linear Stress-Strain/Vorticity Relations," *Proc. of 3rd Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*, Crete, Greece.
- (11) Shih, T. H., Zhu, J. and Lumley, J. L., 1993, "A Realizable Reynolds Stress Algebraic Equation Model," *NASA TM-105993*.
- (12) Myong, H. K., 2002, "Development of 3-D Convective Heat Transfer Analysis Program using Structured Grid System," (in Korean) *Proc. KAMES 2002 Joint Symp. (KSME Part)*, pp. 2614~2619.
- (13) Fujita, H., Yokosawa, H., Hirota, M. and Nishigaki, S., 1987, "Fully Developed Turbulent Flow in a Square Duct with a Rough Wall," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, (in Japanese), Vol. 53, No. 492, B, pp. 2370~2376.
- (14) Perkins, H. J., 1970, "The Formation of Streamwise Vorticity in Turbulent Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 44, pp. 721~740.