

< 논문 >

원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내 발달하는 난류유동에 관한 수치해석

명 현 국*

(2006년 3월 31일 접수, 2006년 8월 22일 심사완료)

Numerical Simulation of Developing Turbulent Flow in a Circular Pipe of 180° Bend

Hyon Kook Myong

Key Words: Turbulent Flow(난류유동), 180° Bend(180° 굽은 곡관), Turbulence Model(난류모델), Numerical Simulation(수치해석), Unstructured Cell-Centered Method(비정렬 셀 중심 방법)

Abstract

A numerical simulation is performed for developing turbulent flow in a strongly curved 180 deg pipe and its downstream tangent by a new solution code(PowerCFD) which adopts an unstructured cell-centered method. The governing equations are discretized as the full elliptic form of the equations of motion. Three typical two-equation turbulence models of low-Reynolds-number form are used to approximate the turbulent stress field. Solutions for both streamwise and circumferential velocity components are compared with the experimental data by Azzola et al.(1986). The $k-\omega$ model by Wilcox(1988) is found to give better prediction performance than the other two. Predicted secondary velocities and streamwise velocity component contours at sequential longitudinal stations are also presented in order to enable a detailed description of the complete flow. It is also found that, in the bend both mean streamwise and secondary velocities never achieve a fully-developed state and the code is capable of producing very well the complex nature of steady flow in a strongly curved pipe.

1. 서 론

유동방향으로 곡률을 가지는 곡관(원관 및 사각형 덕트)내 유동은 블레이드 통로, 원심압축기, 원심펌프, 터빈장치의 흡입구나 통풍관, 공장들의 파이프 시스템, 열교환기의 냉각코일, 생체순환기의 동맥 및 정맥과 같은 혈류시스템 등과 같은 전형적인 기계공학응용 분야와 선박유체역학 분야에서 광범위하게 널리 활용되고 있다. 또한, 이

와 같은 3차원 곡관내 유동은 굽은 면을 따라 흐르는 유동에 의해서 생성되는 원심력, 관성력, 점성력 등의 상호작용으로 인하여, 주유동 방향(streamwise 또는 longitudinal) 속도와 압력손실이 공간적으로 재분배되어 곡관 내부에서는 나선형의 복잡한 대칭형 이차유동(secondary flow)이 발생되어진다.⁽¹⁾ 이러한 유동의 속도분포 및 압력손실 등과 같은 국소 유동변수는 기계장치를 설계할 경우 최적화라는 관점에서 중요한 의미를 가진다. 따라서 곡관내에서의 유동은 지난 수 십 년간 많은 연구와 관심의 대상이 되어 왔다.⁽¹⁻⁸⁾ 그러나 이들 곡관내 유동에 대한 연구의 대부분은 사각형 단면을 갖던지 층류유동에 대한 것으로, 원형

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

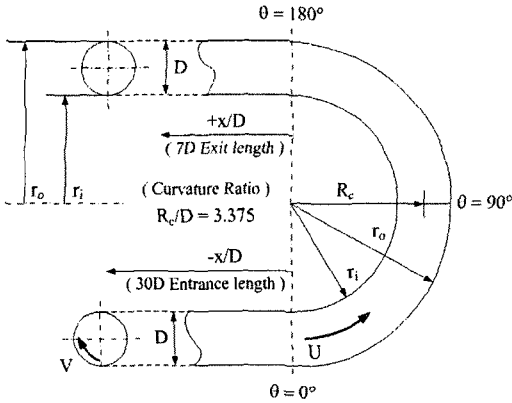


Fig. 1 Schematic diagram in a circular pipe of 180 deg bend

단면을 갖는 곡관내 유동에 대한 연구는 상대적으로 적다. 이것은 특히 원형 단면을 갖는 180° 곡관내 난류유동이 실험에서는 측정상의 어려움 때문에, 수치해석적 면에서는 수치해석방법상의 문제 및 난류유동장에 대한 해석적 난점 때문으로 사료된다.

원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내 난류유동에 대한 실험적 연구는 Rowe⁽⁵⁾에 의해 열선유속계를 사용하여 처음 수행되었으나, 상대적으로 빈약한 실험데이터만을 제공하므로 수치해석결과와 비교하기에는 부족하다. Azzola et al.⁽⁷⁾은 LDA를 사용하여 곡률 반경방향에 수직한 방향에 대한 속도의 2성분 및 레이놀즈응력의 2성분만을 측정하였으며, 국내에서도 최 및 이⁽⁸⁾는 열선유속계를 사용하여 보다 많은 실험결과를 얻었다. 그러나 곡관내 유동장을 완전히 이해하기에는 아직 실험결과가 부족한 상황으로, 향후 수치해석 방법 및 난류모형의 평가를 위해서도 곡관내의 여러 위치에서 발생하는 벽면 근방 및 대칭 단면을 포함하여 주유동 방향에 수직인 단면 전체에 대한 난류속도장 및 레이놀즈응력과 같은 난류 유동장 특성을 제시하는 보다 신뢰성 있는 실험결과가 요구된다.

한편 원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내 난류유동에 대한 수치해석적 연구는 Azzola et al.⁽⁷⁾에 의해 수행되었다. 이들은 난류모델로 표준 $k-\epsilon$ 모델과 함께 벽면근방에는 벽함수 대신 혼합거리 모델을 채용함으로써, 이들이 사용한 수치해석방법은 주유동 방향으로 유동역류가 발생하지 않는다는 가정하에 도넛형 좌표계로 표현된 지배방정

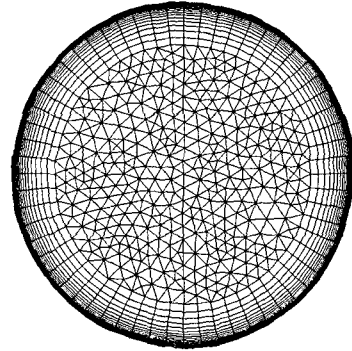


Fig. 2 Computational mesh for cross-section in a circular pipe of 180 deg bend

식의 반타원형(semi-elliptic) 이산화방법에 기초하고 있다. 그러나 일반성을 가진 곡관유동 해석방법을 확립시키기 위해서는 완전 타원형 이산화방법에 기초한 수치해석방법 및 벽함수를 사용하지 않는 저레이놀즈수형 난류모델을 채용할 필요가 있다. 최근 명⁽⁹⁾은 원형 단면을 갖는 90° 굽은 곡관내 층류유동에 대해 완전 타원형 이산화방법에 기초하고 비정렬 셀 중심 방법(unstructured cell-centered method)을 채택하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD)⁽¹⁰⁾를 적용하여 수치해석방법(또는 코드)의 적합성 및 유효성을 확인하였다.

본 연구에서는 원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내의 난류유동을 대상으로 하여 곡관부 입구에 충분히 발달된 유동이 유입될 경우 이것이 곡관내부유동에 미치는 영향을 PowerCFD 코드를 사용하여 수치해석하고, 곡관내의 주요 지점에서 발생하는 대칭 단면을 포함하여 주유동 방향에 수직인 단면 전체에 대한 유동장의 형태에 대해 분석함으로써 급격히 굽은 원형 단면을 가지는 곡관내에서의 복합유동현상을 이해하고자 한다. 또한 대표적인 세 가지 저레이놀즈수형 2-방정식 난류모델을 적용하여 얻어진 수치해석 결과를 실험결과⁽⁷⁾와 비교분석함으로써 난류모형을 평가하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구에서 대상으로 하는 유동은 Azzola et al.⁽⁷⁾이 실험한 원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내 난류유동으로, Fig. 1에 이 유동을 수치해석하

기 위해 사용한 기하학적 형상, 좌표계와 기호를 나타낸다. 본 연구에서는 수치해석을 위해 Azzola et al.⁽⁷⁾의 실험과 같이 관의 직경 D 와 평균 주유동방향 속도 U_b 를 기준으로 정의된 레이놀즈수 (Reynolds number)는 57,400이며, 굽은 곡관의 평균 곡률반경 R 은 $3.375D$ 인 난류유동에 대하여 해석하였다.

수치해석에서는 완전히 발달된 유동이 곡관 입구부에 유입되도록 하기 위하여 180° 곡관부 입구 영역에 해당하는 직관부의 길이를 $30D$ 로 하고, 출구영역에 해당하는 직관부 길이는 $7D$ 로 하였다. 참고로, 이 두 길이는 계산시간을 줄이기 위해 실험조건보다는 다소 짧으나, 곡관 영역내 유동예측 결과에는 거의 영향을 미치지 않음이 확인되었다. 또한 유동은 대칭조건이지만, 본 연구에서 사용한 수치해석 방법이 격자의 비대칭성에 무관하게 대칭유동을 형성함을 입증하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 원관 전체 단면적에 대하여 해석하였다.

본 연구에서는 난류모델의 평가를 위해 대표적인 2-방정식 난류모델인 Launder-Sharma⁽¹¹⁾의 $k-\epsilon$ 모델(이하 LS Model), Wilcox⁽¹²⁾의 $k-\omega$ 모델 (Wilcox Model) 및 Menter⁽¹³⁾의 Shear Stress Transport 모델(SST Model)을 선택하였으며, 이 난류모델들은 모두 저레이놀즈수형 난류모델이다.

Fig. 2는 본 수치해석을 위해 사용한 격자 형태를 보여주고 있다. 먼저 입구의 원형단면에서 중심에서부터 삼각형과 사각형의 혼합격자를 생성한 뒤 관의 중심축을 따라 적층하여 혼합격자(프리즘 + 육면체)로 구성된 격자를 생성하였고, 굽은 곡관을 기준으로 조밀하다가 양끝 즉, 입구와 출구에 해당하는 영역에 이르러 격자점간의 간격이 넓어지는 비등간격의 격자 형태를 취하였다. 여기서 굽은 곡관영역에서의 유선방향 격자간격은 3도로 유선속도 방향으로 60등분의 일정한 간격으로 격자를 배치시켰다. 결과적으로 본 연구를 위해 사용된 격자수는 프리즘 셀이 92,820개, 육면체 셀이 109,200개로 총 202,020개이다. 또한, 본 연구에서 사용한 난류모델들이 저레이놀즈수형 난류모델이므로 벽면에서 첫 번째 셀까지의 거리가 무차원 길이(y^+)로 1 이하가 되도록 하였다.

참고로 본 연구에서 대상으로 한 유동만을 고려하는 경우, 유동의 대칭성을 고려하여 원형 단

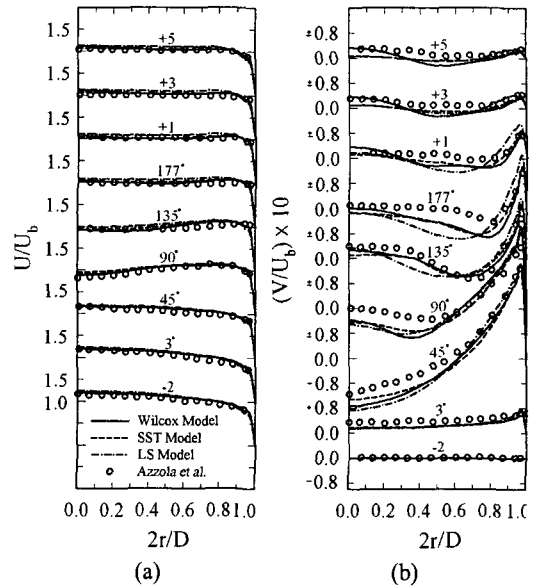


Fig. 3 Comparisons of (a) streamwise mean velocity and (b) circumferential mean velocity components at sequential longitudinal stations in a 180 deg curved pipe with straight tangents

면적의 절반만을 계산영역으로 취해 정렬격자를 사용하는 것이 더 경제적일 수도 있다. 그러나 일반적인 곡관유동 해석을 위해서는 원형 단면 전체 영역을 대상으로 해야 하는 수치해석 방법이 필요하며, 이 경우 정렬격자로 원형 곡관 내의 격자를 생성하는 경우 일반적으로 특이점을 포함하거나 찌그러짐이 큰 격자의 생성을 피할 수 없게 된다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 비정렬 혼합격자를 사용함으로써 원형 단면 전체 영역을 대상으로 하면서도 특이점을 포함시키지 않고, 격자의 찌그러짐도 거의 없앨 수 있었다.

본 연구에서 계산에 사용된 지배방정식은 무차원화된 Navier-Stokes 방정식 및 난류모델 방정식이다. 이 식들을 풀기 위해 본 연구에서는 완전 타원형 이산화방법에 기초하고 비정렬 셀 중심방법을 채택한 3차원 유동해석코드인 PowerCFD 코드⁽¹⁰⁾를 사용하였다. 참고로 코드에 사용된 수치해석방법 및 2차원 유동에 대한 예측성능평가는 참고문헌^(10,14)에 상세히 기술되어 있으며, 최근 명⁽⁹⁾은 원형 단면을 갖는 90° 굽은 곡관내 층류유동에 대해 이 코드를 적용하여 코드(또는 수치해석방법)의 적합성 및 유효성을 확인하였다. 또한, 대류

항 계산은 해의 정확도를 위해 2차 정확도를 가지는 중심차분도식을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 곡관부를 통과하면서 대칭평면에 수직인 방향에서 예측된 주유동방향 및 원주방향 속도분포를 Azzola et al.⁽⁷⁾의 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 비교를 위해 나타낸 주유동방향 위치는 직관부에 대해서는 $x/D = -2, 1, 3$ 및 5이고, 곡관부에서는 $\theta = 3^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 177^\circ$ 이다.

본 연구에서 적용한 세 가지 난류모델의 수치예측 결과는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 곡관내 전 유동장에 걸쳐 주유동방향 속도에 대한 실험적 사실⁽⁷⁾을 모두 매우 잘 나타내고 있다. 즉, 곡관의 처음 절반영역($\theta = 3^\circ$ 부터 90° 까지)에서 주유동방향 속도분포는 주유동의 중심영역은 속도를 잃어버리는데 반해 벽면 근방 유동은 가속되고 있으며, 90° 을 지나서는 거의 변화가 없는 양상을 잘 재현하고 있다. 참고로 반타원형 이산화방법에 기초한 Azzola et al.⁽⁷⁾의 수치예측 결과는 $\theta = 90^\circ$ 에서 축상에서의 주유동방향 속도가 크게 감소하는 자신들의 실험결과를 제대로 재현하지 못하고 있으나, 완전 타원형 이산화방법에 기초하고 비정렬 셀 중심방법을 채택한 본 수치해석 방법은 그림에서 보는 바와 같이 이 실험적 사실을 매우 잘 재현하고 있다.

한편, Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 원주방향 속도에 대해서도 정성적으로는 실험적 사실⁽⁷⁾을 비교적 잘 재현하고 있다. 즉, $\theta = 3^\circ$ 에서 곡관의 영향으로 이차유동이 곡관 전체에 걸쳐 원관 외측으로부터 내측으로 흐르나, 주유동 방향 속도가 낮은 벽면 근방에서 발달하는 원주방향 속도(이차유동)는 계속 지속되며 급격히 발달하여, $\theta = 45^\circ$ 까지 대칭면상으로 반환유동을 가지는 하나의 셀 형태를 가지며 $\theta = 45^\circ$ 에서 $(V/U_b)_{max} \sim 0.3$ 이 된다. 또한 $\theta = 45^\circ$ 부터 135° 사이에서 V 속도는 $r/(D/2) < 0.5$ 인 유체 중심부에서 횡단면유동(cross-stream flow)은 움직임 면에서 두 번째 역전을 경험하며, 원관 내측 반경쪽으로 다시 향하여, 결과적으로 내측 반경쪽에서 외측 반경쪽으로 향하는 횡단면유동 영역이 중심과 벽면 사이에서 갈라지게 되는 매우 특이한 유동양상을 나타내고 있다 (예를 들어 $\theta = 135^\circ$ 에서 $V/U_b \sim -0.06$). 더욱

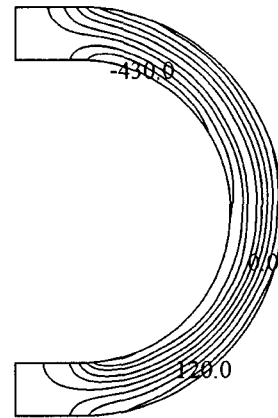


Fig. 4 Pressure contours at symmetric plane (predicted by Wilcox model)

하류인 $\theta = 135^\circ$ 와 $x/D = 5$ 사이에서 음의 횡단면 유동 영역은 점차 사라지지만, 그 존재에 대한 흔적은 계속되는 V 속도분포에 남아 있다. 이와 같이 본 수치예측 결과는 원주방향 속도가 곡관 출구부에 도달할 때까지 계속적으로 변한다는 Azzola et al.⁽⁷⁾의 실험결과를 잘 나타내고 있다.

그러나 정량적으로는 실험결과를 포함해 세 모델의 예측결과 사이에도 다소 차이를 나타내고 있다. 즉, LS 모델은 곡관부 및 출구영역 전체에 대해 다른 두 모델에 비해 예측성능이 상대적으로 가장 떨어지고 있다. 반면, SST-모델은 곡관부 처음 절반영역에 대해서, Wilcox 모델은 곡관부 후반 절반영역 및 출구영역에 대해서 상대적으로 우수한 예측성능을 나타내고 있어, 실험결과와의 오차를 고려할 때 두 모델은 우열을 가리기 어려우나, Wilcox 모델이 전체적으로 가장 좋은 예측성능을 나타낸다고 볼 수 있다.

원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내 난류유동의 복합유동현상을 이해하기 위해 여기부터는 Wilcox 모델을 사용하여 예측된 결과를 가지고 고찰하기로 한다. Fig. 4에는 대칭평면에서의 곡관부내 등압력선도를, Fig. 5에는 곡관 여러 위치에서의 주유동방향 속도벡터를, 그리고 Fig. 6에는 유동방향을 따라 여러 횡단면상에서의 이차유동 벡터 및 주유동방향 등속선도를 각각 나타낸다. 먼저 Fig. 4의 등압력선도를 보면 직관부에서 유동방향에 따라 단조 감소하던 압력장이 곡관부에 들어서면서 원심력, 관성력 및 점성력의 상호작용에 의해 매우 복잡한 압력장을 형성하고 있음을 알 수 있

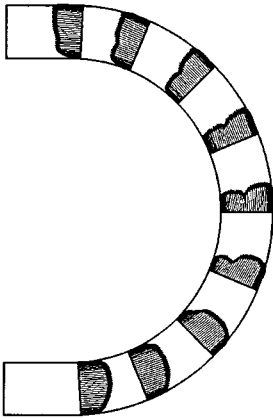


Fig. 5 Streamwise velocity vector plot at sequential longitudinal stations($\theta=3^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ, 177^\circ$) and symmetric plane(predicted by Wilcox model)

다. 이러한 복잡한 압력장으로 인해 Fig. 5의 주유동방향 속도분포에서 보는 바와 같이 곡관 입구부에서 곡관의 내측을 향해 가속되던 주유동이 곡관을 통과하며 점차 외측으로 옮겨져, $\theta = 45^\circ$ 에서는 최대속도가 완전히 외측으로 옮겨져 있으며, 내측에 새롭게 약한 최대속도가 나타나 $\theta = 67.5^\circ$ 에서 명확히 두 개의 봉우리 형태의 이중 극대 속도분포를 가진다. 이 두 봉우리의 최대속도는 하류로 갈수록 내측 봉우리의 최대속도는 커지나, 외측 봉우리의 최대속도는 작아지며 내측 속도영역이 넓어지다 $\theta = 135^\circ$ 를 지나서는 다시 외측의 속도영역이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, Azzola et al.⁽⁷⁾은 Fig. 3(a)에 나타난 대칭평면에 수직한 방향에서 예측된 주유동 방향 속도분포의 실험결과만을 바탕으로 곡관에서 $\theta = 90^\circ$ 이상의 영역에서는 주유동방향 성분이 거의 변하지 않는다고 보고하고 있으나, Fig. 3(a)와 Fig. 5의 본 수치 예측결과를 보면 주유동방향 성분이 곡관 출구부까지 지속적으로 변하고 있음을 알 수 있다.

주유동방향 및 이차유동 속도성분이 곡관부 출구에서 완전히 발달한 상태에 도달하지 않고, 곡관부 전 영역에서 지속적으로 변하고 있음은 Fig. 6에 나타난 유동방향을 따라 여러 횡단면상에 나타난 주유동방향에 대한 등속선도 및 이차유동 속도벡터를 보면 더욱 명확해진다. 또한, Fig. 6으로부터 이차유동의 영향으로 주유동방향 속도분포가 바뀌어가는 양상을 용이하게 식별할 수 있

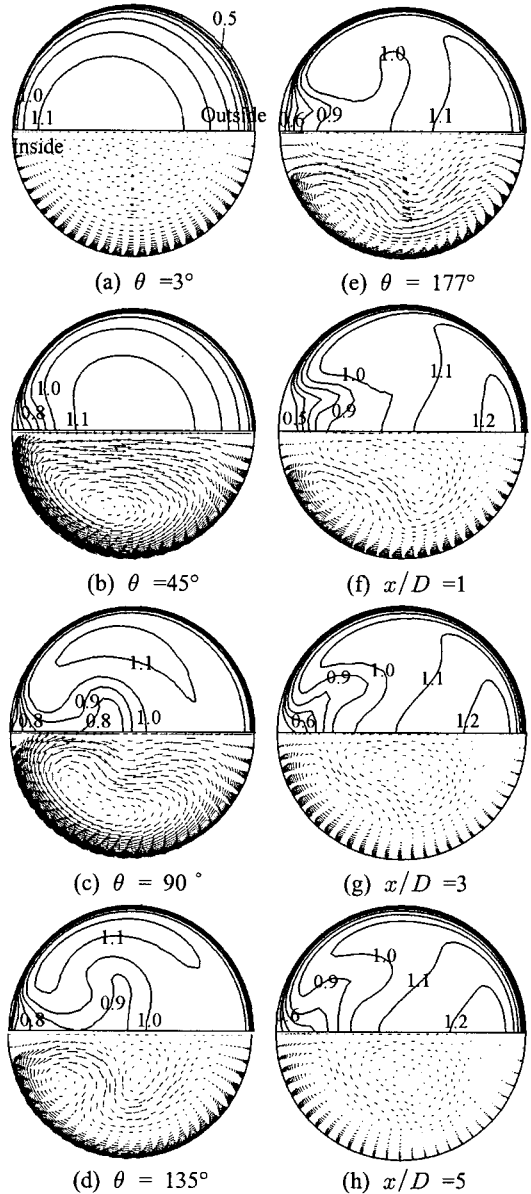


Fig. 6 Calculated flow development in a 180° curved pipe with straight tangents by Wilcox model. Top figures show streamwise (U/U_b) velocity component contours. Bottom figures show cross-stream velocity vectors, in which $0.10D$ corresponds to $0.20U_b$

다. 즉, 곡관 입구부인 $\theta = 3^\circ$ 에서 이차유동은 곡관유동에서 잘 알려진 바와 같이 곡관의 외측과 내측 벽면 근방 영역사이에 원심력에 의해 형성

된 내측을 향한 횡압력구배력에 의해 야기된다. 비교적 작은 곡률반경으로 인해 상대적으로 강한 횡압력구배력은 원관 중심에서도 관성력보다 커서 입구유동에서 관성력에 의해 외측으로 향하려는 횡단면상 거동을 극복시켜 역전하도록 작용하여, 결과적으로 입구유동은 점진적으로 곡관의 내측을 향해 가속된다. 또한 원관 벽면 근방에서는 낮은 주유동방향 속도로 인해 상대적으로 횡압력구배력이 더 크게 작용하여 유동을 곡면을 따라 원주방향으로 원관 중심영역보다 더 큰 이차속도를 가지고 관 내측 반경쪽으로 흐르게 한다. 이 원관 벽면 근방의 이차속도는 곡관을 지나면서 더욱 강해져 대칭면상으로 반환유동을 가지게 하여 전술한 바와 같이 하나의 커다란 셀 형태를 가지는 이차유동으로 되면서 내측으로 치우친 주유동방향 속도성분을 외측으로 밀고 들어오게 된다. 이것이 더욱 진행되어 $\theta = 90^\circ$ 및 135° 에서 최대 주유동방향 속도가 축에서 벗어난 위치에 있게 되나, 대칭면상의 반환유동이 점차 약해짐에 따라 $\theta = 135^\circ$ 및 $\theta = 177^\circ$ 의 등속선도 및 이차유동 벡터에서 볼 수 있듯이 중심평면상의 이차유동의 재역전 현상이 일어나게 된다. 또한, $\theta = 90^\circ$ 및 135° 에서의 등속도선을 보면 곡관의 입구부에서 상대적으로 가속되었던 내측 벽면 부근에서의 속도는 횡단면상의 대칭선 부근에서 매우 감속된 분포를 보여주며, 또한 곡관내 유동에서 의 전형적인 속도분포인 이중 극대현상이 매우 두드러지게 나타난다. 이와 함께 전술한 바와 같이 $\theta = 90^\circ$ 부터 $r/(D/2) < 0.5$ 인 유체 중심부에서 횡단면 이차유동은 움직임면에서 두 번째 역전을 경험하며, 원관 내측 반경쪽으로 다시 향하여, 결과적으로 음의 횡단면유동영역이 중심과 벽면 사이에서 감히게 되는 매우 특이한 유동양상을 나타내며, 더욱 하류인 $\theta = 135^\circ$ 와 $x/D = 5$ 사이에서 음의 횡단면유동 영역은 점차 사라지지만, 그 존재에 대한 흔적이 계속되고 있다는 Azzola et al.⁽⁷⁾의 실험적 사실을 Fig. 6의 이차유동 속도벡터로부터 명확히 알 수 있다.

4. 결론

원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내 발달하는 난류유동을 대상으로 하여 곡관부 입구에 충분히 발달된 유동이 유입될 경우 이것이 곡관부 내부

유동에 미치는 영향을 완전 타원형 이산화방법에 기초하고 비정렬 셀 중심 방법을 채택하고 있는 3차원 유동해석코드(PowerCFD)⁽¹⁰⁾를 사용하여 수치해석하고, 곡관내의 주요 지점에서 발생하는 유동장의 형태에 대해 분석함으로써 급격히 굽은 원형 단면을 가지는 곡관내에서의 복합유동현상을 파악하였다. 또한 대표적인 세 가지 레이놀즈수형 2-방정식 난류모델을 적용하여 얻어진 수치해석 결과를 실험결과⁽⁷⁾와 비교분석함으로써 난류모형을 평가하였다. 연구결과,

(1) 원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내의 난류유동에서 주유동방향 및 이차유동 속도성분이 곡관부 출구에서 완전히 발달한 상태에 도달하지 않고, 곡관부 전 영역에서 지속적으로 변하고 있는 것으로 확인되었다.

(2) 난류모델로는 Wilcox의 2-방정식 난류모델이 전체적으로 원형 단면을 갖는 180° 굽은 곡관내의 난류유동에 대해 우수한 예측성능을 제시하는 것으로 나타났다.

(3) 유동방향을 따라 곡관부내 여러 횡단면상의 주유동방향 및 이차유동 속도 및 형태에 대한 예측결과는 실험적 사실을 상당히 잘 재현하고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 3차원 유동해석코드는 유연성과 함께 수치해석방법을 포함해 굽은 곡면을 가지는 원관 내에서 강한 2차유동을 포함한 3차원 복합유동의 특성과 현상을 적절하게 예측할 수 있음이 확인되었다.

향후 굽은 곡관내 난류유동에 대한 곡관의 평균 곡률반경 R 및 레이놀즈수의 영향에 대한 체계적인 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2006년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구이다.

참고문헌

(1) Humphrey, J. A. C., Whitelaw, J. H. and Yee, G., 1981, "Turbulent Flow in a Square Duct with Strong Curvature," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 103, pp. 443~463.
 (2) Enayet, M. M., Gibson, M. M. and Yianneskis, M., 1982, "Measurements of Turbulent Developing

- Flow in a Moderately Curved Square Duct," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, No. 4, pp. 221~224.
- (3) Taylor, A. M. K., Whitelaw, J. H. and Yianneskis, M., 1982, "Curved Duct with Strong Secondary Motion: Velocity Measurements of Developing Laminar and Turbulent Flow," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 104, pp. 350~359.
- (4) Chang, S. M., Humphrey, J.A.C. and Modavi, A., 1983, "Turbulent Flow in a Strongly Curved U-Bend and Downstream Tangent of Square Cross Sections," *PhysicoChemical Hydro-dynamics*, Vol. 4, No. 3, pp. 243~269.
- (5) Rowe, M., 1970, "Measurements and Computations of Flow in Pipe Bends," *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, pp. 771~783.
- (6) Berger, S., Talbot, L. and Yao, L. S., 1983, "Flow in Curved Pipes," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 15, pp. 461~512.
- (7) Azzola, J., Humphrey, J.A.C., Iacovides, H. and Launder, B. E., 1986, "Developing Turbulent Flow in a U-Bend of Circular Cross-Section: Measurement and Computation," *Trans. ASME J. of Fluids Eng.*, Vol. 108, pp. 214~221.
- (8) Choi, Y. D. and Lee, G. H., 1998, "Measurement of Turbulent Flow Characteristics in a Circular Duct with a 180° Bend by Hot Wire Anemometer," *Proc. of KSME Spring Meeting*, Part B, pp. 365~370.
- (9) Myong, H. K., 2006, "Numerical Simulation of Laminar Entry Flow in a Circular Pipe of 90° Bend," submitted to *Trans. KSCFE J. of Computational Fluid Engineering*.
- (10) Myong, H. K. and Kim, J., 2005, "Development of 3-D Flow Analysis Code Using Unstructured Grid System (I) - Numerical Method," *Trans. of the KSME Part B*, Vol. 29, pp. 1049~1056.
- (11) Launder, B. E. and Sharma, B. I., 1974, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc," *Lett. Heat Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 131~138.
- (12) Wilcox, D. C., 1988, "Reassessment of the Scale Determining Equations for Advanced Turbulence Models," *AIAA J.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299~1310.
- (13) Menter, F. R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA J.*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (14) Myong, H. K., Kim, J. and Kim, J. E., 2005, "Development of 3-D Flow Analysis Code Using Unstructured Grid System (II) - Code's Performance Evaluation," *Trans. of the KSME Part B*, Vol. 29, pp. 1057~1064.