

곡면 엘보우를 가진 사각덕트 내의 유속측정 및 수치계산에 관한 연구

윤영환[†], 박원구

창원대학교 기계공학과

Study on Velocity Measurement and Numerical Computation in a Rectangular Duct with 90° Bend Elbow

Young Hwan Yoon[†], Won Gu Park

Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

(Received July 29, 2003; revision received September 19, 2003)

ABSTRACT: Fluid flow in a rectangular duct for 90° bend elbow with the ratio of 1.5 between its curvature radius and width is measured by 5W laser doppler velocity meter. The fluid flow is also computed by commercial software of STAR-CD for comparison between measured and computed velocity profiles in the duct. Reynolds numbers for the comparison are 11,643, 19,746 and 24,260. From the comparison, computation of principal velocity components in the duct predicts the experimental data somewhat satisfactorily, even though those of minor velocity components and turbulent kinetic energy do not match with the experimental data quite well. K-factor for the bend elbow is computed to be average 0.086 while the equivalent ASHRAE data is 0.07.

Key words: 90° Rectangular bend elbow(직사각 곡면 엘보우), Laser doppler velocity meter(레이저 도플러 유속계), Three dimensional numerical computation(삼차원 수치계산), Turbulent flow(난류유동)

기 호 설 명

K : 난류 운동에너지 [m^2/s^2]
 l : 난류 혼합길이 [m]
 ΔP : 압력강하 [N/m^2]
 U_i : i 방향 평균 유속성분 [m/s]
 u'_i, u'_j : i, j 방향 난류성분 [m/s]
 V_m : 평균 유속 [m/s]

U, V, W : x, y, z 방향 평균 유속 [m/s]
 u', v', w' : x, y, z 방향 난류성분 [m/s]

그리스 문자

ϵ : 난류 소산에너지 [m^3/s^2]
 μ_t : 난류 점성계수 [kg/ms]
 ρ : 공기밀도 [kg/m^3]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-55-279-7501; fax: +82-55-275-0101

E-mail address: yhyoon@sarim.changwon.ac.kr

상첨자

- : 평균 성분

1. 서론

곡관내의 유동해석은 응용범위가 광범위하고 다양하여 많은 관심의 대상이 되고 있으며 공기 조화설비, 열교환기, 유체수송시스템의 유체유동에 대한 응용 등 공학 전반에 걸친 실제적인 분야에 많이 응용이 될 수 있다.

대부분 열유체 기계 내에서 유동은 복잡한 형태의 3차원 난류유동이어서 예전에는 주로 실험적 방법으로 유동특성을 해석하였으나, 수치해석용 상용 프로그램의 연산속도의 고속화, 난류특성을 잘 예측할 수 있는 난류모델의 개발로 유동특성 연구에 많은 진전을 보이고 있다.

유체의 유동에 영향을 주는 요인으로 유체 자체의 물성치와 더불어 유체가 통과하는 형상이 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 곡관부 내에서 유동변화는 전체 시스템에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 Choi et al.⁽¹⁾은 직사각형 단면, Mahank et al.⁽²⁾은 타원형(oval) 단면, 그리고 Ushijama⁽³⁾는 원형 단면의 곡관에 대해 수치해석을 분석하였다. 그리고 Shao et al.⁽⁴⁾은 수치해석 결과로부터 압력손실 예측에 대한 CFD의 정확성을 논하였다. 이와 같이 수치해석은 각종 형상의 단면이나 운전조건에 대해 편리하게 해석할 수 있는 장점이 있으나 실험결과와 비교하여 그 정확성을 입증한 논문들은 그리 흔치 않다. 따라서 Shin⁽⁵⁾과 같이 굽은 도관 내에서 단순히 수치해석 결과만 제시하거나 Kim and Kim⁽⁶⁾과 같이 풍동 내의 3차원 유동해석 결과를 다른 사람의 실험결과와 비교하기도 한다. 본 논문은 사각 엘

보우의 곡률 반경과 덕트의 폭과의 비가 1.5를 갖는 90° 곡관 덕트 내의 3차원 유동을 Laser Doppler 유속계로 측정된 실험결과와 상용 소프트웨어인 STAR-CD를 이용한 계산결과와 비교하였다. 운전조건은 난류유동으로 덕트 내의 수력 직경과 평균 유속으로 정의된 Reynolds 수가 11,643, 19,716 및 24,260 등 세 가지에 대해 수행하였다.

일반적으로 배관의 입구경계조건은 단순히 균일한 값을 주는 경우가 많으나 본 논문에서는 배관의 입구경계조건을 실험에서 구한 값들을 사용하여 수치해석 결과를 얻었다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험장치는 Fig. 1과 같이 팬(fan)으로 공기가 송풍되며 풍량은 인버터에 의해 모터의 회전수를 변경하여 제어한다. 송풍된 공기는 수축부를 지나서 상하 2곳에서 가슴기로 수분무 입자를 공급한다. 공기와 수분무의 혼합기체가 측정부인 L자형 사각덕트를 지나 배출된다. 측정부 이전의 배관은 아크릴판으로 구성했으며 측정부는 레이저 유속계에서 나오는 레이저 빔(beam)의 투과를 위해 유리판으로 제작되었다. 이때 공기 중의 수분무 입자가 레이저 광선을 산란시켜 유속을 측정한다. 그리고 배관의 치수는 Fig. 2에 나타나 있다.

2.1.1 레이저 유속계

레이저 유속계는 유동중의 조그만 입자에 의해

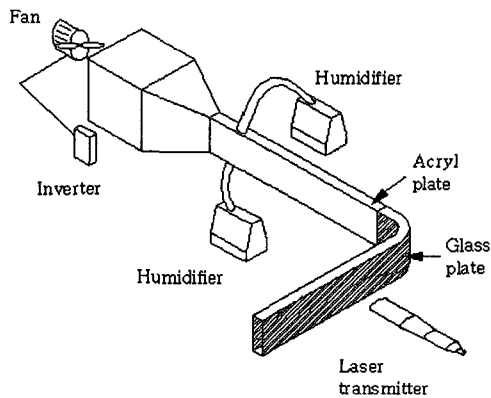


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for rectangular duct.

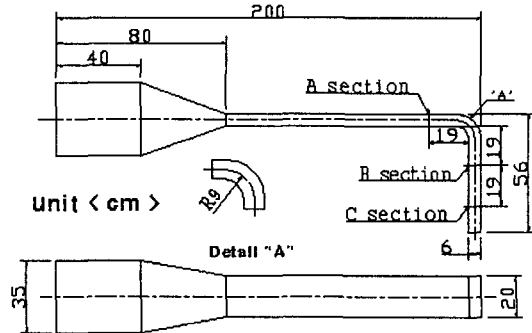


Fig. 2 Dimension of experimental apparatus.

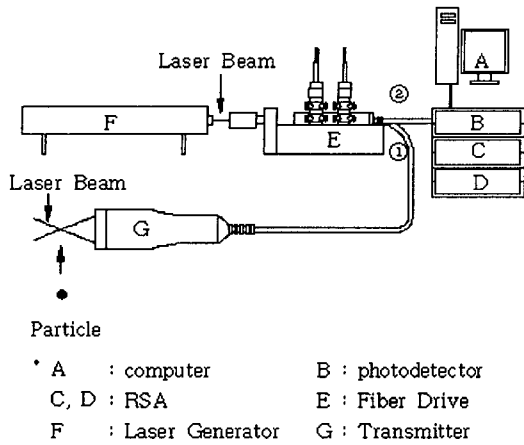


Fig. 3 Schematic diagram of LDV system.

산란된 빛의 도플러 편이를 이용하는 것으로 레이저 광선을 이용하기 때문에 유체의 흐름을 방해하지 않고 속도보정이 필요없으며 역방향 유속도 측정할 수 있다. 따라서 유속 측정범위가 매우 넓고 정확한 속도의 측정이 가능하다.

본 실험에 사용된 LDV 장치는 2차원 (u, w) 측정용으로 5W용의 Ar-Ion 레이저 장치로서 Fig. 3에 LDV 유속계의 개략도를 나타내고 있다. 동 실험장치와 측정방법은 Yoon et al.⁽⁷⁾에 자세히 기술되어 있다.

2.2 실험방법

유속의 측정위치는 Fig. 2의 A, B 및 C 단면(section)에서 측정되었는데 앞으로 편의상 A, B,

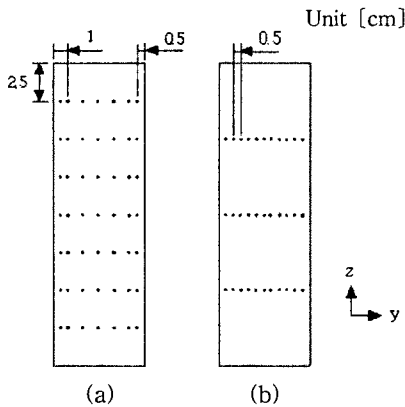


Fig. 4 Velocity measurement points at inlet, middle and exit cross-sections.

및 C 단면을 입구단면(inlet), 중간단면(middle section) 및 출구단면(exit)이라 부르기로 하자. 각 단면들의 크기는 (6 cm×20 cm)로서 입구단면에서는 Fig. 4의 (a)와 같이 총 49개 지점으로 측정하였으며 중간단면과 출구단면은 (b)에 도시한 세 개의 가로 점선 선분과 같이 0.5 cm 간격으로 측정하여 차후 계산결과와 비교하고자 한다. 그리고 각 지점들에서 유속을 세 번 측정하여 평균하였다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

본 계산은 상업용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 계산하였으며 지배방정식은 식(1)과 식(2)와 같다.⁽⁸⁾

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i' u_j'}) \tag{2}$$

위의 운동방정식 중 $\overline{u_i' u_j'}$ 항을 정해 주기 위해 다음과 같이 정의한다.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \frac{2}{3} \delta_{ij} K + \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{3}$$

식(3)의 μ_t 는 난류 점성계수로서 $K-\epsilon$ 난류모델에서 다음과 같이 가정한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \tag{4}$$

위 식의 K 와 ϵ 은 각각 난류 운동에너지와 난류 소산에너지로서 표준난류모델에 의해 풀이하였다.

3.2 격자

유체는 공기로서 Fig. 5에서 abcd 단면으로 들어가서 ijkl 단면으로 나오며 그 이외의 표면들은 모두 벽면들이다. 입출구 단면은 (6×20) cm²로서

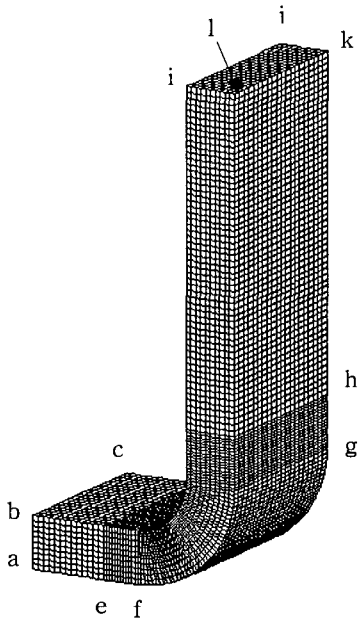


Fig. 5 Representation of cells in three dimensional computation.

(10×20)개의 셀을 사용하였고 그중 좁은 변(6 cm)은 10개의 등간격 셀로 나누었고 넓은 변(20 cm)은 20개의 등간격 셀로 나누었다. 벽면에서 첫번째 셀의 중심까지 거리 y 는 STAR-CD User Guide⁽⁹⁾의 추천대로 $30 < y^+ < 150$ 사이가 되도록 하였다. 그리고 a-e 구간은 입구덕트로서 그 길이가 8.9cm이며 그 사이를 13개의 격자로 나누었고 곡관으로 유체가 들어가기 직전인 e-f 구간의 12개는 그 전방 간격의 1/2이다. 이는 유체가 곡관으로 들어갈 때 유속변화가 클 것으로 예상한 때문이다. 그리고 h-k 구간은 출구덕트로서 길이가 38 cm로서 그 구간을 57개의 간격으로 나누었으며 곡관에서 바로 나오는 g-h 구간은 18개로 h-k 구간의 1/2 간격이고 f-g 구간은 40등분으로 하였다. 그리하여 동 덕트에 사용된 총 셀수는 31,000개이며 질점은 65,582개이다.

공기의 물성치는 각 Reynolds 수의 증가에 따라 24.4℃, 21.8℃ 및 20.1℃에 해당하는 물성치들을 사용하였다.

3.3 경계조건

본 논문은 3차원 유동계산으로서 난류인 경우

직교좌표 x, y 및 z 축에 대한 평균 유속성분 U, V 및 W 와 난류모델에서 사용되는 K 와 ϵ 등 모두 5개의 변수에 대한 경계조건이 필요하다. 본 논문의 특징은 입구 경계조건을 LDV에 의해 실험에서 구한 값들을 사용한 것이다. Fig. 5에서 보면 $x(ae)$ 방향 유속 U 가 주 흐름방향으로 가장 크고 그 다음이 $z(bc)$ 방향 유속 W 일 것이고, $y(ab)$ 방향 유속 V 는 가장 적을 것이다. 본 논문은 2차원 LDV 유속장치로 측정하여 U 와 W 의 유속분포를 입구단면에서 총 49개 지점의 유속들을 측정하여 입구 경계조건으로 했다.

V 유속성분은 측정치 않았으나 W 유속성분이 거의 영에 가까우므로 V 유속성분은 영으로 가정했는데 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$U_{in} = U_{exp}, \quad V_{in} = 0, \quad W_{in} = W_{exp} \quad (5)$$

위 식에서 첨자 in은 입구단면이며 exp는 실험값을 뜻한다.

다음 난류 운동에너지 K 는 다음 식으로 표시된다.

$$K = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (6)$$

위 식(6)에서 $\overline{u'}$ 와 $\overline{w'}$ 는 LDV 유속계에서 측정하였고 $\overline{v'}$ 는 측정하지 않았으나 $\overline{w'}$ 와 같다고 가정하고 아래 식과 같이 K 의 입구 경계조건을 취하였다.

$$K = \frac{1}{2}[\overline{u'^2} + 2 \cdot \overline{w'^2}] \quad (7)$$

그리고 난류 소산에너지 ϵ 의 입구 경계조건은 식(7)의 K 값과 난류 혼합길이(mixing length) l 을 이용하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{K^{1.5}}{l} \quad (8)$$

위 식에서 난류상수 C_μ 는 0.09이고, 난류 혼합길이 l 은 실험장치의 유동폭의 10%인 0.006 m로 하였다.

그리고 모든 벽면에서 유속성분은 0인 조건(non-slip condition)으로 하였다.

$$U_{\text{wall}} = V_{\text{wall}} = W_{\text{wall}} = 0 \quad (9)$$

또한 벽면에서 난류 경계조건은 STAR-CD 프로그램에서 two-layer model과 wall function model 중에서 선택할 수 있는데 본 계산에서는 wall function model을 사용하였다.

마지막으로 출구경계조건은 Neumann 조건으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial K}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

3.4 수치계산

본 계산에 사용된 STAR-CD 상업용 프로그램은 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하고 있으며, 계산조건은 정상상태 및 비압축성 유동이다. 또한 최대 오차한계(residual tolerance)는 0.005이며 cpu time은 359.2~375.0 sec이었다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6의 (a)에 3차원 계산결과를 예로 도시하였고 같은 그림의 (b)에는 입구, 중간 및 출구 단면들의 위치와 그 좌표를 나타내고 있다. 즉, 곡관에 의해 흐름의 방향이 바뀌더라도 각 단면에서 주속도 방향을 x , 6 cm변을 y 및 20 cm변을 z 축으로 정하여 실험결과와 계산결과를 나타내고자 한다.

먼저 Fig. 7은 주유속 성분인 U 에 대한 실험결

과와 계산결과를 비교한 것으로 (a), (b) 및 (c)는 Fig. 5의 격자시스템에서 각각 입구단면, 곡관을 지나서 19 cm 하류지점 단면 및 출구단면을 각각 나타내며, $z=5, 10, 15$ cm는 z -방향의 상부, 중부 및 하부 선분들을 나타낸다. 따라서 (a)는 입구단면에서 유속분포인데 모두 측정값들이며 이들은 수치해석의 입구 경계조건으로 사용되었다. (b)는 엘보우를 지나 19 cm 하류단면으로 곡관의 안쪽 ($y=0$ cm)으로 갈 수 있도록 유속이 느려지고, 곡관의 바깥쪽 ($y=6$ cm)으로 갈수록 유속이 빨라지는 경향을 보이고, (c)의 출구단면에서는 다시 유속이 평준화될려고 하는 경향을 보이고 있다.

여기서 실험결과와 계산결과는 다소 차이가 있으나 계산결과가 실험값을 비교적 잘 모사하고 있으며 $z=1, 3$ 및 5 cm에서 실험결과에 대한 계산결과의 오차를 계산하면 0.51~19.17%이고 평균 오차는 7.71%이다.

Fig. 8은 주속도방향 U 와 직교성분 W 에 대한 것으로 표기방법은 전과 같다. 계산값과 측정값은 전과 같은 방법으로 오차를 계산하면 0.69~73.11% 및 평균 오차 23.62%로 큰 차이를 보이나 그 절대값이 모두 적으므로 전체 유속분포나 압력강하에 영향이 적을 것이다.

다음 Fig. 9는 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)의 계산결과와 식(7)로 구한 실험값을 서로 비교한 것이다. 먼저 (a)는 입구단면의 실험값으로 수치계산의 입구 경계조건으로 사용한 값들이고, (b)는 엘보우를 지난 중간단면으로 곡관 안쪽(y 값이 적을수록)에서 난류도가 크게 나타나고 곡관 바깥쪽으로 갈수록 적어짐을 볼 수 있으나 계산값들은 이와 반대 현상을 보이고 있다. 실험값에서는 유체가 엘보우를 지나면서 곡관 안

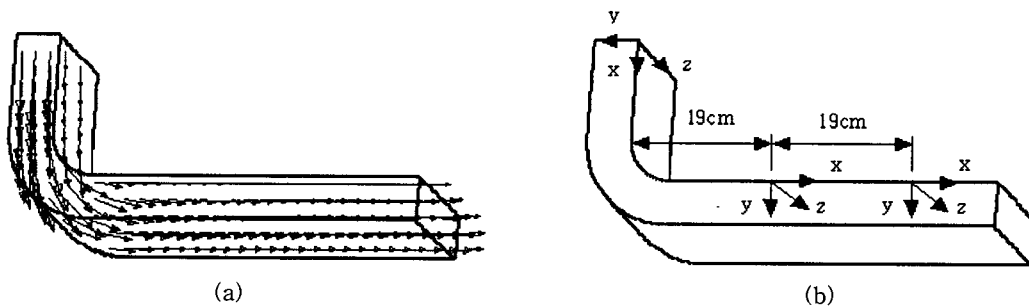


Fig. 6 Computation result of velocity vectors in 3 dimension and axis representations for distributions of fluid flow at each cross-section.

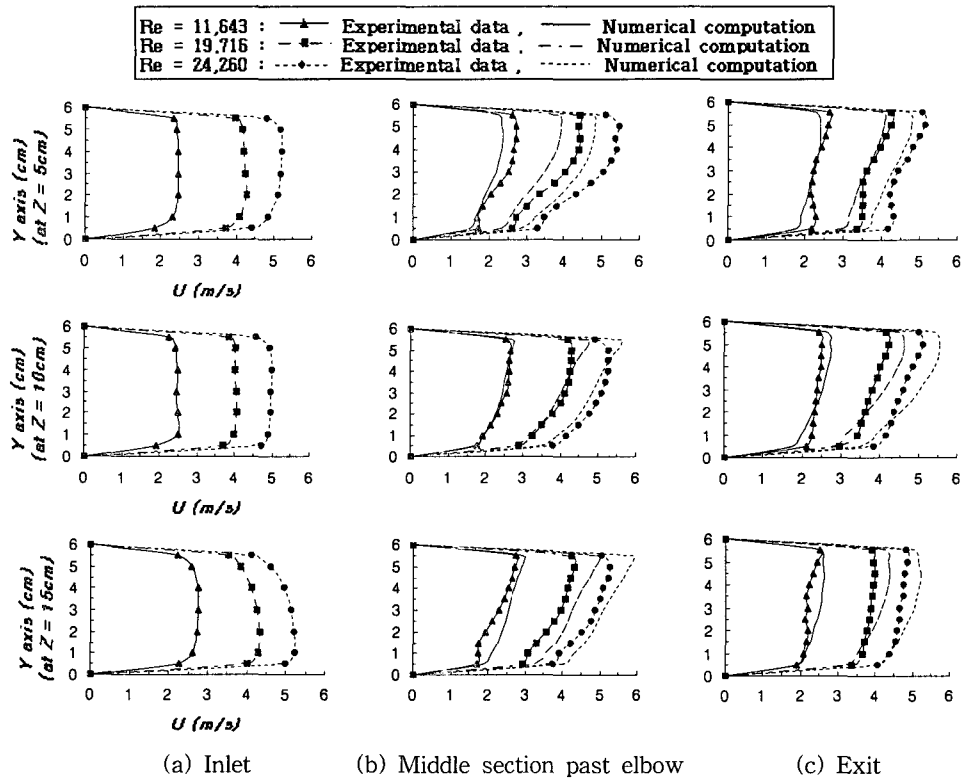


Fig. 7 Comparison of x-direction velocity (U) between experimental data and 3-D computation data.

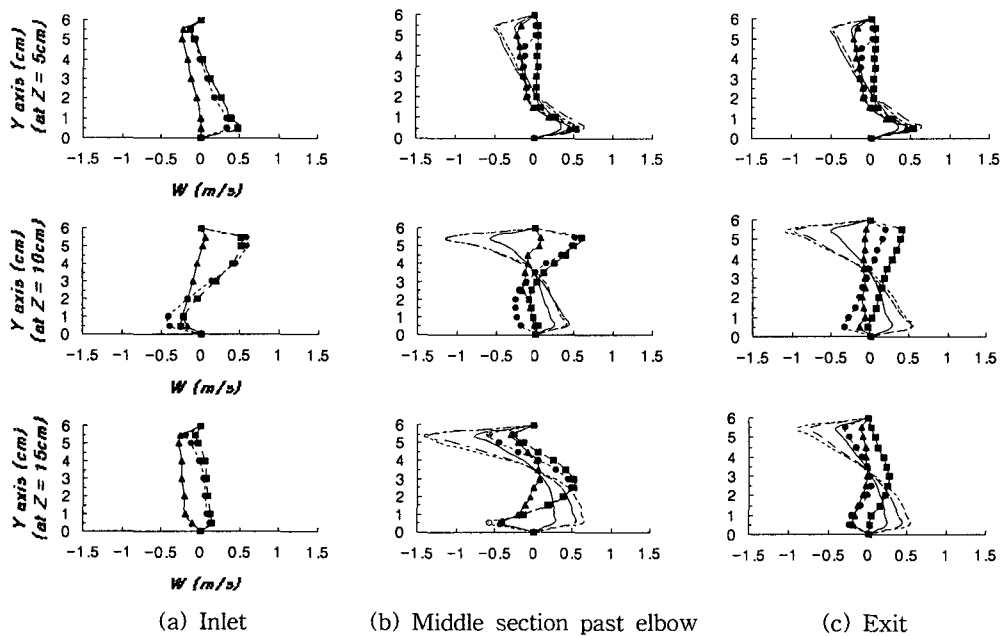


Fig. 8 Comparison of z-direction velocity (W) between experimental data and 3-D computation data.

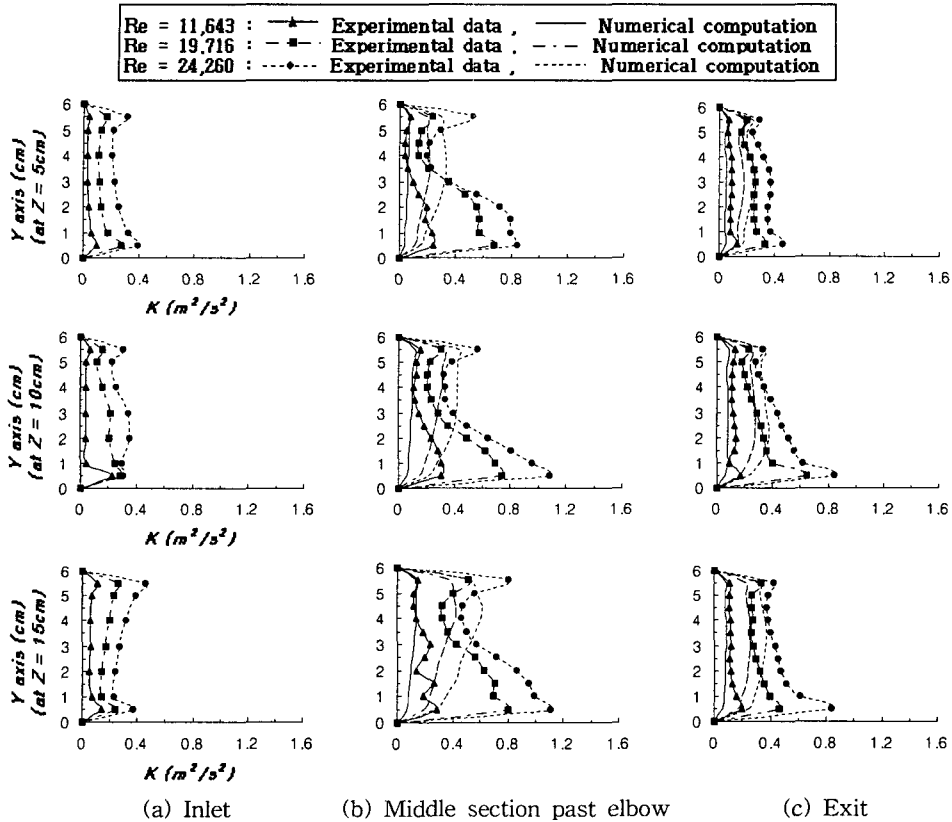


Fig. 9 Distribution of turbulent kinetic energy K .

쪽에 와류가 생성되어 이와 같은 현상을 보이는 것으로 추정되나 계산값은 이를 제대로 묘사하고 있지 않다. 그러나 Reynolds 수가 증가할수록 난류도가 증가한다든지 출구단면에서 난류도가 평균화 혹은 그 크기가 감소되는 현상은 실험값과 계산값이 같은 경향을 보이고 있다. 참고로 전과 같은 방법으로 오차의 범위는 0.12~81.78%이며

평균 오차 33.74%이다.

다음 수치계산 결과로부터 식(11)에 의해 엘보우의 K -factor를 구하고 본 논문의 엘보우와 같은 단면비 및 곡률비를 가진 엘보우에 대한 Wirt⁽¹⁰⁾의 시험결과와 ASHRAE⁽¹¹⁾의 설계자료를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보면 본 수치계산값은 Wirt의 측정값과 ASHRAE의 설계자료 값 사이에 위치함을 볼 수 있다.

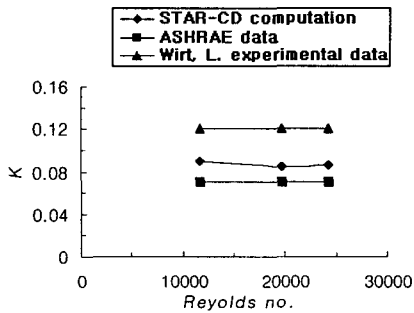


Fig. 10 Friction factor.

$$K = \frac{\Delta P \cdot 2}{V_m^2 \cdot \rho} \quad (11)$$

5. 결 론

본 논문에서는 사각 엘보우의 곡률 반경과 덕트의 폭과의 비가 1.5를 갖는 90° 곡관 덕트 내의 3차원 유동에 대해 Laser Doppler 유속계로 측정 한 실험결과와 수치해석 결과와 비교하기 위해

수치계산의 입구 경계조건에 실험값을 대입하고 3차원으로 해석하여 유체가 곡면 회전 후 중간단면 및 출구단면에서 유속분포를 상호 비교하였다. 본 논문에서 덕트 내의 Reynolds 수는 11,643, 19,716과 24,260이다.

(1) 주유속 성분인 U 는 유체가 90° 곡관을 지나면서 회전 안쪽은 유속이 느려지고 바깥쪽은 유속이 빨라지는 현상을 보이며 이는 Reynolds 수가 클수록 그 경향이 커짐을 볼 수 있고 하류로 흐르면서 다시 유속분포가 균일해지려는 경향을 보이고 있어 이는 통상적 곡관 흐름의 물리현상을 그대로 나타내고 있으며 계산결과가 실험값을 비교적 잘 모사한다고 볼 수 있다.

(2) 주유속 성분과 직교 방향인 W 는 계산결과와 실험값이 일치하지 않으나 그 절대값이 모두 적으므로 전체 유속분포나 압력강하에 별로 영향을 주지 않는 것으로 생각된다.

(3) 본 계산에 사용된 $K-\epsilon$ 표준난류모델의 난류 운동에너지 K 에 대해 실험값과 계산값을 상호 비교한 결과 유체가 직각 회전 후 와류에 의해 난류도가 증가하다가 하류로 흐를수록 난류가 다시 소멸하는 현상은 실험값과 계산값이 같은 경향을 보였으나 실험값과 계산값의 구체적인 분포는 서로 차이가 있다.

(4) 본 사각단면을 가진 곡면 엘보우의 K -factor는 수치계산 결과 평균 0.086이었으며 이는 다른 사람의 실험값인 0.12와 ASHRAE의 설계자료값인 0.07 사이에 위치한다.

참고문헌

1. Choi, Y. D and Moon, C., 1994, Numerical analysis of turbulent flow and heat transfer in a rectangular duct with a 180° bend degree, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 325-336.
2. Mahank, T. A. and Mumma, S. A., 1997, Flow modeling of flat oval ductwork elbows using computational fluid dynamics, ASHRAE Transactions: Research, Vol. 103, 4027 (RP-854), pp. 172-177.
3. Ushijama, S., 1994, Prediction of thermal stratification in a curved duct with 3D body fitted co-ordinate, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 19, pp. 647-665.
4. Shao, L. and Riffat, S. B., 1995, Accuracy of CFD for predicting pressure losses in HVAC duct fitting, Applied Energy, Vol. 51, pp. 233-248.
5. Shin, B., 1997, The numerical study of a 3-D curved duct flow by incompressible Navier Stokes code, Journal of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 25, No. 6, pp. 34-44.
6. Kim, H. M. and Kim, K. Y., 1998, A Study on turbulence models for the analysis of 3-dimensional flow, Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference (I), pp. 384-389.
7. Yoon, Y. H., Bae, T. H. and Park, W. G., 2001, Velocity measurement in a rectangular duct with 90° mitered elbow, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 1184-1195.
8. Star-CD, 1999, Methodology v3.10, Computational Dynamic Ltd., pp. 1-1, 2-6.
9. Star-CD, 1999, User Guide v3.10, Computational Dynamic Ltd., pp. 1-9.
10. Wirt, L., 1927, General Electric Rev., 30-6 (1927-6), p. 286.
11. ASHRAE Hand Book, 1977, Fundamentals.

1. Choi, Y. D and Moon, C., 1994, Numerical analysis of turbulent flow and heat transfer in a rectangular duct with a 180° bend degree, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 6, No. 3,