

정사각형 단면을 갖는 180° 곡관에서 위치별 속도분포특성 및 직관거리의 유효성에 관한 연구

진정정¹, 윤준규^{2*}

¹가천대학교 대학원 기계공학과, ²가천대학교 기계공학과

A Study on Velocity Distribution Characteristics for Each Location and Effectiveness of Straight Duct Length in a Square-sectional 180° Bended Duct

Jing-Jing Chen¹, Jun-Kyu Yoon^{2*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon Univ.

²Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

요약 본 연구는 정사각형 단면 180° 곡관 내의 유동특성을 파악하기 위해 RSM 난류모델을 이용하여 작동유체, 입구의 공기속도, 관내의 표면조도, 곡률반경 및 수력직경 등의 다양한 유동인자를 변경하여 각도 위치별 속도분포특성을 수치해석을 통하여 고찰하였다. CFD 해석시 경계조건은 공기와 물의 입구온도를 288 K, 293 K로 설정하였고, 입구의 공기속도, 관내의 표면조도, 곡률반경 및 수력직경은 각각 3~15 m/s, 0~0.001 mm, 2.5~4.5D, 70~100 mm로 적용하여 해석을 수행하였다. 그 결과를 정리하면, 작동유체의 유동특성은 유체의 점성력 차이로 속도분포가 크게 달라짐을 알 수 있었고, 곡관부 내에서의 최대 속도프로파일은 90° 단면위치에서 $X/D=0.8$ 영역으로 나타났으며, 180° 단면위치에서는 $Y/D=0.8$ 영역으로 나타났다. 그리고 관내의 표면조도가 낮고, 곡률반경이 클수록 속도변화율은 크게 변하여 나타났다. 또한 곡관후류의 직관부에서 유동편차가 안정화되는 직관거리는 $L/D=30$ 영역에서 나타내어 유량 계측시 유효한 측정위치로 잘 제시할 수 있었으며, 수력직경에 따라 곡관후류 직관부의 표준편차특성은 동일한 유속일 때 최소의 편차영역은 대체로 직관거리 $L/D=15\sim30$ 범위로 나타났다.

Abstract This study numerically analyzes the characteristics of the velocity distribution for each location of a square-sectional 180° bent duct using a Reynolds Stress Turbulent model. The flow parameters were varied, including the working fluids, inlet velocity, surface roughness, radius of curvature, and hydraulic diameter. The boundary conditions for computational fluid dynamics analysis were inlet temperatures of air and water of 288 K and 293 K, inlet air velocity of 3-15 m/s, inner surface roughness of 0-0.001 mm, radius of curvature of 2.5-4.5 D, and hydraulic diameter of 70-100 mm. The working fluid characteristics were highly affected by changes in the viscous force. The maximum velocity profiles in the bent duct were indicated when the 90° section was in the region of $X/D=0.8$ and the 180° section was in the region of $Y/D=0.8$. Lower surface roughness and higher radius of curvature resulted in a higher rate of velocity change. Also, an efficient measuring location downstream of the bent duct is suggested since the flow deviations were the most stable when the straight duct length was in the region of $L/D=30$. The minimum deviations at the same velocity conditions according to the hydraulic diameter were mostly indicated in the range of $L/D=15-30$ based on the standard deviation characteristics.

Keywords : Square-sectional Bended Duct, Reynolds Stress Model, Velocity Distribution, Working Fluids, Straight Duct Length

*Corresponding Author : Jun-Kyu Yoon (Gachon Univ.)

Tel: +82-31-750-5651 email: jkymoon@gachon.ac.kr

Received July 7, 2016

Revised August 4, 2016

Accepted October 7, 2016

Published October 31, 2016

1. 서론

곡관내의 유동해석은 유체기계(원심압축기, 원심펌프, 터빈장치 등)의 유로, 열교환기의 냉각코일, 발전기의 내부냉각통로, 공장 내의 파이프시스템 등과 같은 다양한 산업분야에 응용이 가능하면서 많은 연구가 이루어지고 있다[1],[2]. 연구동향으로서 Sohn 등[3],[4]는 정사각형 단면 180° 곡관에 연결된 직관덕트의 출구영역에서 발달되는 층류정상유동에 대해 PIV 실험과 CFD해석을 통하여 축방향속도분포 및 2차유동에 대한 유동특성을 고찰하였으며, Park 등[5]는 정사각형 단면 180° 곡관덕트의 입구영역에서 LDV시스템을 이용하여 곡관에서 실험적으로 규명하기 위해 천이유동의 축방향 속도분포와 2차원유동 등을 계측하여 유체역학적 길이를 잘 제시하였으며, Bong과 Cho[6]은 정방형 180° 곡관내에서 공기유동특성이 원심력에 미치는 영향을 실험 및 해석적으로 고찰하여 축방향속도분포는 원심력에 큰 영향을 받으며 곡관 180° 근방에서 좌우대칭의 속도분포를 보였다. 그리고 Lim과 Yoo[7]은 정사각형 덕트의 출구영역에서 속도분포에 대한 유동특성을 고찰하기 위해 실험결과와 비교한 결과로 RNG $k-\epsilon$ 모델이 표준 $k-\epsilon$ 모델보다 좋은 결과를 나타냈으며, Yang과 Choi[8]은 정사각형 단면을 갖는 180° 곡관내의 열전달해석을 위하여 난류 열유속의 모형을 적용하여 Nusselt수 및 무차원온도의 특성을 Johnson[9]의 실험결과와 비교하여 수치해석의 예측을 보였다. Lee 등[10]은 정사각형 단면 180° 곡관덕트로 구성된 덕트입구영역에서 LDV를 이용하여 축방향 및 횡방향의 위치변화에 따른 축방향의 속도분포와 유동특성을 고찰하였고, Bong과 Cho[11]은 정방형 180° 곡관덕트내에서 공기유동특성이 원심력에 미치는 영향을 실험적으로 규명하기 위해 LDV로 계측하여 FLUENT 수치해석과 비교한 결과로 축방향속도분포는 원심력의 영향을 받음을 보여주었다. 또한 Rudolf와 Desova[12]는 여러 형태의 곡관을 모델링하여 레이놀즈수를 60,000으로 동일하게 적용한 후 속도분포, 와류 및 수력손실 발생 등의 현상을 수치해석적으로 고찰하여 완전히 발달된 난류영역은 곡관후류로부터 직관거리는 40 배 이상이 필요하다고 하였고, Carlander와 Delsing[13]은 엘보 1개와 다른 평면으로 결합된 2개의 엘보 하류 직관거리 $L/D=15$ 지점에서 초음파유량계를 사용하여 실험조건을 레이놀즈수 25~110,000범위로 설정하여 유량

실험을 한 결과로 레이놀즈수 4,000에서 최대오차가 3~4%가 발생함을 보여주었다. 본 연구에서는 정사각형 단면을 갖는 180° 곡관내 유체의 속도분포특성을 고찰하기 위하여 먼저 Chang 등[14]이 수행한 연구결과와 비교를 통해 수치해석 난류모델에 대한 타당성 검증을 수행한 후 곡관내의 작동유체, 입구속도, 표면조도, 곡률반경, 수력직경 등의 유동인자에 따른 속도분포특성을 분석하고, 곡관후류에 연결된 직관내의 유체속도특성의 결과를 토대로 유량계측에 유효한 직관거리의 위치를 제시하는데 있다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 ANSYS v.16에서 제공하는 전처리 프로그램인 Design Modeler를 이용하여 정사각형 단면을 갖는 180° 곡관을 모델링하였으며, 해석모델의 기본 제원 및 형상은 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 Chang 등[14]가 수행한 실험결과와 동일한 조건에 대한 비교를 30D의 직관을 별도로 모델링한 후 입구속도 9.2 m/s에 대한 수치해석을 수행한 후 출구에서의 완전발달된 속도분포결과를 FLUENT가 제공하는 Profile기능을 이용하여 Fig. 1의 입구속도조건으로 사용하였다. Table 1에서 *의 의미는 곡관하류에서 민감도 분석시 직관거리 60D까지 모델링하여 해석하기 위한 것이다.

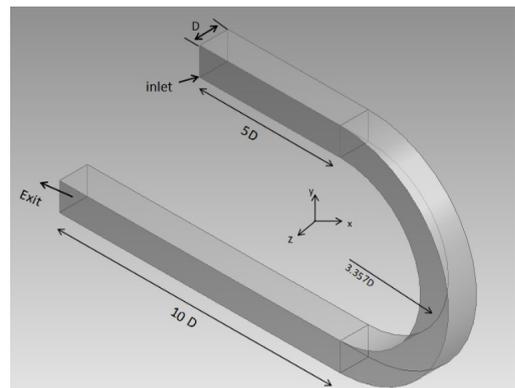


Fig. 1. Computational domain definition

Table 1. Basic specifications of square-sectional 180° bended duct

Square section (D × D)	88.9×88.9 mm ²
Radius of curvature	3.357D
Front straight length	5D
Rear straight length	10D*
Inlet velocity of air	9.2 m/s

2.2 지배방정식

본 연구에서 180°곡관의 내부유동은 3차원 정상상태, 비압축성 난류유동으로 가정하였으며, 난류모델로는 기존의 난류모델에 비해 강한 와류, 유선 곡률 및 회전이 수반되는 복잡한 3차원유동에 적합한 RSM(Reynolds Stress Model) 난류모델을 사용하였다. 지배방정식으로 사용된 연속방정식, 운동량방정식 및 레이놀즈응력을 풀기 위한 수송방정식 등은 다음과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

- 운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + S_i \tag{2}$$

- 수송방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i' u_j'}) = D_{ij} + \phi_{ij} + G_{ij} - \epsilon_{ij} \tag{3}$$

여기서 D_{ij} 는 확산(Diffusion)항, ϕ_{ij} 는 압력변형(Pressure strain)항, G_{ij} 는 응력생성(Stress Production)항, 그리고 ϵ_{ij} 는 소산(Dissipation)항을 나타내며, 다음과 같다.

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + \overline{p u_j'} \delta_{ik} + \overline{p u_i'} \delta_{jk} - \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i' u_j'}) \right] \tag{4}$$

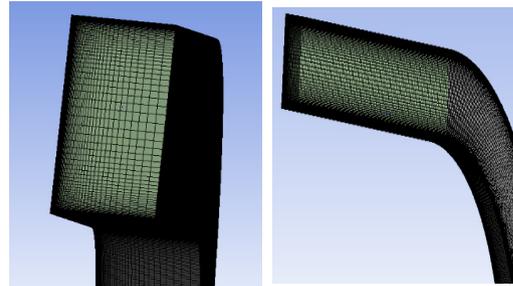
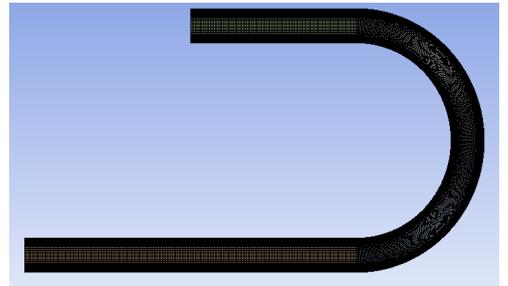
$$\phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \tag{5}$$

$$G_{ij} = \rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \tag{6}$$

$$\epsilon_{ij} = 2\mu \left(\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \right) \tag{7}$$

2.3 수치해석

본 연구의 수치해석을 위한 모델의 격자계는 Fig. 2와 같으며 육면체격자로 구성하였고, 유동장에 사용한 격자 생성은 유입부, 곡관부 및 유출부로 구분하여 유입부는 98*100*100개, 곡관부는 98*100*400개, 유출부는 98*100*200개로 생성하여 총 격자수를 686만개로 구성하였다.



(a) Inlet section mesh

(b) Symmetry plane mesh

Fig. 2. Comprehensive mesh for 180° bended duct

여기서 물리적 구배가 심하게 나타날 것으로 예상되는 벽주위에는 조밀하게 밀집시켜 격자를 생성하였고, 관 중앙부는 난류특성을 고려하여 적절한 간격으로 격자를 생성하였다. 해석대상의 기하학적 형상이 관 중심부에 대해 대칭인 점을 고려하여 1/2영역만을 모델링한 후 중심면에 대칭조건으로 설정하였다. Fig. 2(a)는 곡관입구의 단면에 대한 격자생성이고, Fig. 2(b)는 대칭면에 대한 격자생성을 나타내고 있다. 계산 수렴조건은 격자수

에 수렴된 계산결과를 비교하여 정확성을 유지하기 위해 모든 변수들에 대해 10^{-4} 까지 수렴하도록 하였다. 본 연구의 해석코드는 FLUENT v.16을 사용하였고, 수치 해석을 위한 작동유체의 경계조건은 Table 2에서 나타내었다.

Table 2. Properties of working fluids

Working Fluids	Item	Value
Air	Inlet temperature, T (K)	288
	Density, ρ (kg/m^3)	1.225
	Viscosity, μ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	1.7894×10^{-5}
	Reynolds number	56,000
Water	Inlet temperature, T (K)	293
	Density, ρ (kg/m^3)	998.2
	Viscosity, μ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)	1.003×10^{-3}
	Reynolds number	813,966

2.4 난류모델의 타당성 검증

본 연구에는 정확한 수치해석을 검증하기 위해 기존의 난류모델인 Standard $k-\epsilon$ 모델, RNG (Re-Normalization Group) $k-\epsilon$ 모델, SST (Shear Stress Transport) $k-w$ 모델 및 RSM (Reynolds Stress Model) 을 사용하였다. Fig. 3은 Chang 등[14]이 수행한 실험결과와 비교하기 위해서 동일한 기하학적 형상 및 입구속도 조건에 대하여 곡관부에서 90°의 X축방향 및 180°의 Y축방향에서 얻어진 각각의 속도프로파일을 나타낸 것이다. 여기서 U/U_b 값은 X축 또는 Y축 방향위치에 따른 실제의 국부속도와 입구속도의 비를 나타내는 무차원 속도를 나타낸다. 그 결과로 4가지 난류모델 중에서 복잡한 비등방성 난류, 선회류, 곡률이 강한 유동해석에 적합하게 알려진 RSM 난류모델이 등방성 유동을 가정한 와정성 모델인 Standard $k-\epsilon$ 모델, RNG $k-\epsilon$ 모델, SST $k-w$ 모델보다 더 우수한 결과를 얻게 되어 수치해석의 타당성을 검증할 수 있어 본 연구의 기본 해석모델로 선정하게 되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 작동유체에 따른 속도분포특성

Fig. 4와 Fig. 5는 Table 1과 Table 2의 경계조건과 동

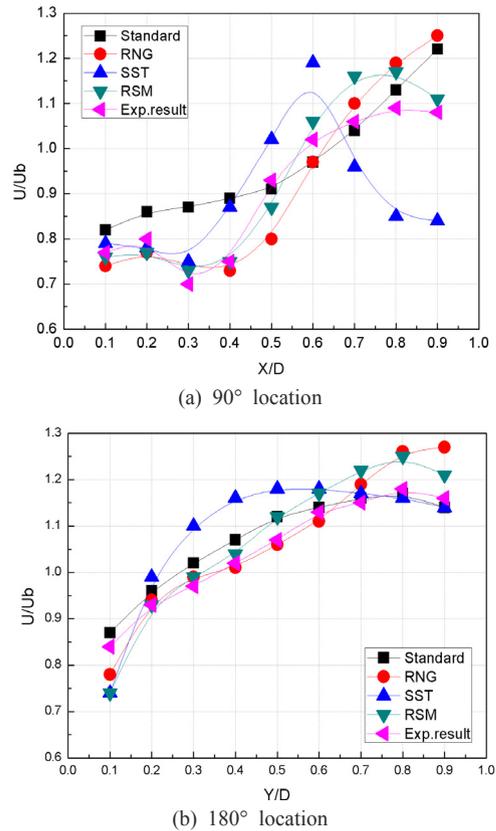


Fig. 3. Velocity profiles according to X and Y axis direction

일하게 입구속도 9.2 m/s에서 서로 다른 작동유체인 물과 공기를 이용하여 곡관부에서 90°의 X축방향 및 180°의 Y축방향에서 얻어진 각각의 속도프로파일 및 유동장 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 곡관부의 90° 단면위치에서 공기의 경우는 $X/D=0.3$ 까지는 안쪽 벽면에 가까운 영역으로 곡관부를 지나면 바깥 벽면쪽의 속도가 치우쳐 나타남으로 인해 상대적으로 낮은 속도분포를 보이다가 그 이후에서는 속도가 증가하여 $X/D=0.8$ 부근에서 최고치를 나타내어 다시 감소함을 보이고 있다.

또한 물의 경우는 Fig. 4(a)와 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 $X/D=0.3$ 까지는 안쪽 벽면에 가까운 영역으로 상대적으로 낮은 속도분포를 보이다가 그 이후에서는 속도가 $X/D=0.6$ 부근에서 최대치를 나타내어 다시 감소함을 알 수 있다. 이는 공기와 물의 점성력 차이로 점성이 낮은 공기는 곡관의 외곽근처에서 벽과의 마찰력이 물에 비해 상대적으로 작음으로 인해 속도가 더 빠르지만 점

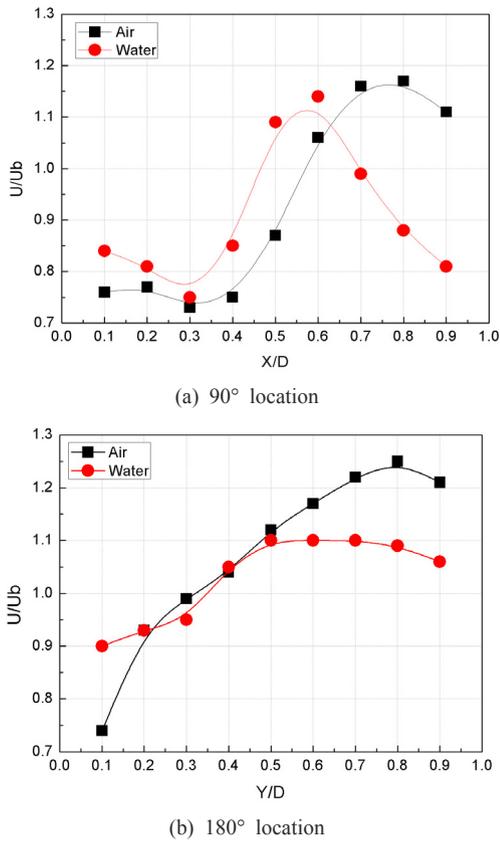


Fig. 4. Velocity profiles of two fluids according to X and Y axis direction

성이 높은 물은 공기와 비교할 때 벽으로부터 떨어진 곡관의 중간영역에서 속도가 더 빠르다는 특성이 있다. 그리고 Fig. 4(b)와 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 곡관부의 180° 단면위치에서 공기의 경우는 $Y/D=0.1$ 로부터 급격한 높은 속도분포를 보이다가 $Y/D=0.8$ 부근에서 최대치를 나타내고 있으며, 또한 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 물의 경우는 $Y/D=0.1$ 로부터 완만한 속도로 증가하는 특성을 보이다가 $Y/D=0.5$ 부근에서 최대속도를 나타남을 알 수 있다. 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 90° 지점에서의 속도편차가 물의 경우 공기에 비해 상대적으로 빠르게 안정화되기 때문이라 사료된다.

3.2 입구속도 변화에 따른 속도분포특성

3.2.1 곡관부의 90° 위치에서 속도분포

Fig. 6과 Fig. 7은 곡관입구의 공기속도를 3, 6, 9.2, 12, 15 m/s에로 변화시켰을 때 곡관부에서 90°의 X축방

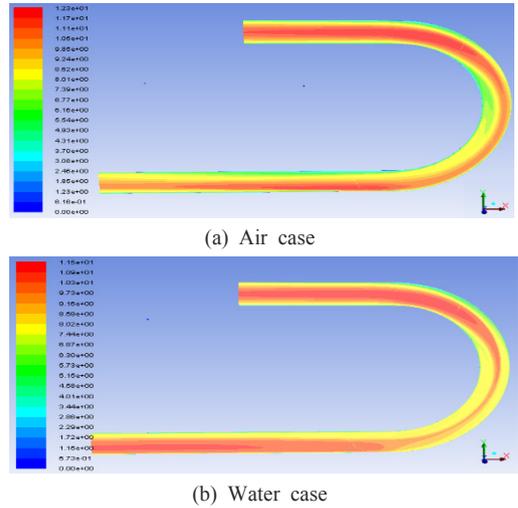


Fig. 5. Velocity distribution according to the variation of working fluids

향에 따른 각각의 속도프로파일 및 유동장 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 $X/D=0.4$ 까지는 안쪽 벽면에 가까운 영역으로 상대적으로 낮은 속도분포를 보이다가 벽으로부터 마찰력의 영향이 약해지면서 그 이후에서는 급격하게 속도가 증가하여 $X/D=0.8$ 부근에서 최대치를 나타내어 다시 감소하는 특성을 보이고 있다. 입구의 유속에 따라 속도프로파일의 변화율은 각각 다르지만 낮은 유속이 6 m/s인 경우 편차가 가장 크고, 높은 유속 15 m/s인 경우에 편차가 낮음을 알 수 있어 대체로 입구의 유속이 작을수록 편차가 큰 경향을 나타낸다.

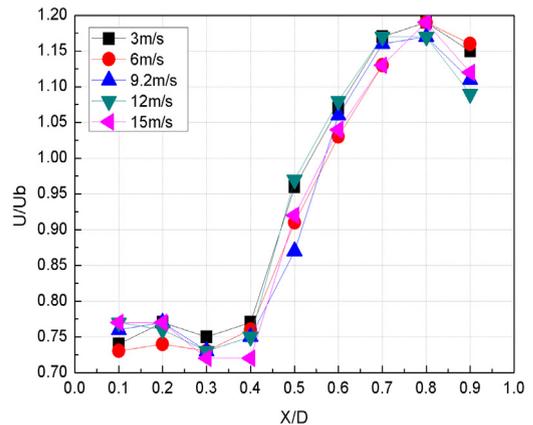


Fig. 6. Velocity profiles of X axis direction at 90° location of bend by changing air inlet velocity ($Z/D=0.75$)

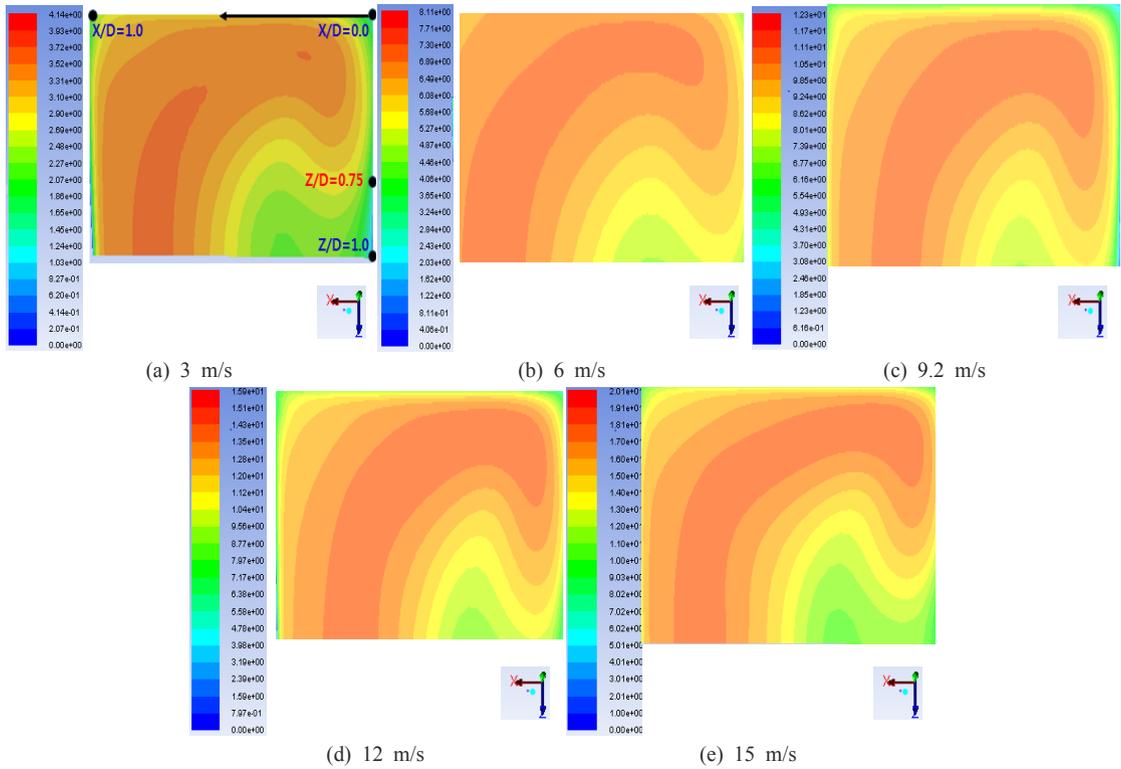


Fig. 7. Velocity contours according to air inlet velocity at 90° location of bend

3.2.2 곡관부의 180° 위치에서 속도분포

Fig. 8과 Fig. 9는 곡관입구의 공기속도를 3, 6, 9.2, 12, 15 m/s로 변화시켰을 때 곡관부에서 180°의 Y축방향에 따른 각각의 속도프로파일 및 유동장 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 입구의 유속에 따라 속도프로파일

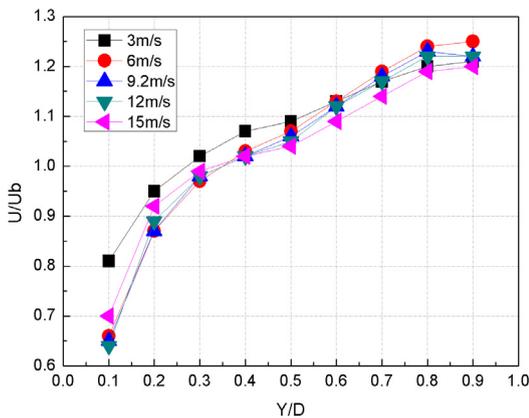


Fig. 8. Velocity profiles of Y axis direction by changing air inlet velocity at 180° location of bend ($Z/D=0.75$)

의 변화율은 각각 다르지만 $Y/D=0.1$ 로부터 점증적으로 속도프로파일이 증가함을 나타내며, 대체로 $Y/D=0.8$ 부근에서 최대치를 나타내고 있지만 그 편차는 각각 다르다. 특히 $Y/D=0.1\sim 0.3$ 영역을 볼 때 유속이 증가할수록 편차가 크고, $Y/D=0.4$ 이후에는 유속이 증가할수록 편차가 더 작아지는 특성을 나타내게 됨을 알 수 있어 더욱 더 유속을 증가시킨다면 완전히 발달된 난류유동특성을 고려한 그 편차는 더 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 표면조도 변화에 따른 속도분포특성

Fig. 10은 곡관내면의 표면조도를 0, 0.001, 0.0001 mm로 변화시켰을 때 곡관부에서 180°의 Y축방향에 따른 각각의 속도프로파일 및 유동장 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 표면조도에 따라 속도프로파일의 변화율은 다소 차이는 있지만 $Y/D=0.1$ 로부터 점증적으로 속도프로파일이 증가함을 나타내며, 대체로 $Y/D=0.8$ 부근에서 최대치를 나타내고 있으며 그 편차는 각각 다르다. 특히 $Y/D=0.1\sim 0.3$ 영역을 볼 때 표면조도가 낮을수록 다소 편차가 크고, $Y/D=0.4\sim 0.6$ 영역에서는 표면조도의

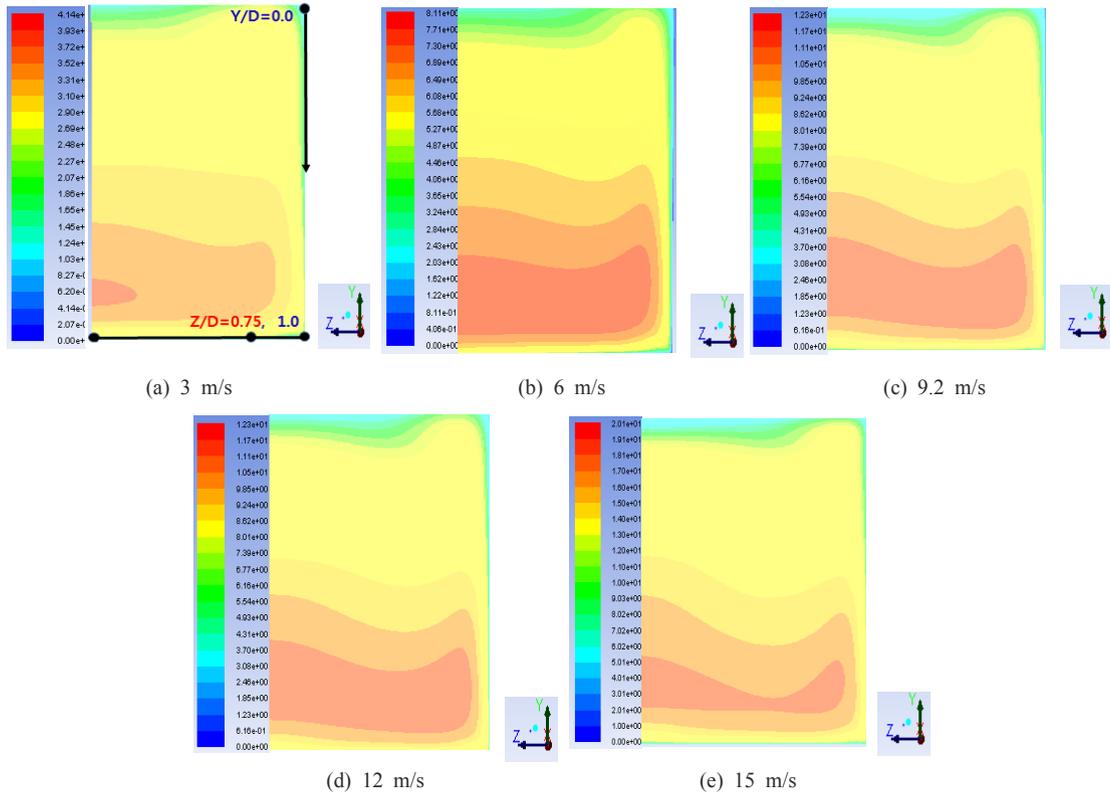


Fig. 9. Velocity contours according to air inlet velocity at 180° location of bend

변화와 관계없이 편차가 비슷한 특성을 보이다가 표면조도가 낮을수록 $Y/D=0.7$ 이후에는 편차가 더 커지는 특성을 나타내고 있다. 이는 따라서 대체로 표면조도가 낮을수록 속도변화율이 다소 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

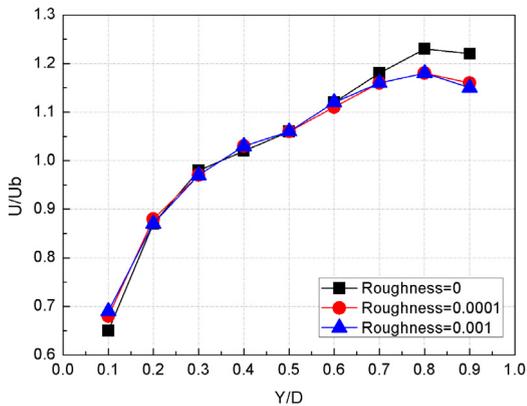


Fig. 10. Velocity profiles of Y axis direction by changing surface roughness at 180° location of bend ($Z/D=0.75$)

3.4 곡률반경에 따른 속도분포특성

Fig. 11은 곡률반경을 2.5D, 3.375D, 4.5D로 변경하였을 때 곡관부에서 180°의 Y축방향에 따른 각각의 속도프로파일특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 곡률반경에 따라 속도프로파일의 변화율은 다소 차이는 있지만 $Y/D=0.1$ 로부터 점증적으로 속도프로파일이 증가하며, 대체로 $Y/D=0.8$ 부근에서 최대치를 보이며 그 편차는 각각 다르다. 특히 $Y/D=0.4$ 이후에서는 곡률반경이 클수록 다소 편차가 크고, $Y/D=0.4 \sim 0.8$ 영역에서는 대체로 곡률반경이 클수록 속도프로파일의 변화율이 더 커지는 특성을 보임을 알 수 있었다.

3.5 곡관후류 직관부에서의 표준편차분포

일반적으로 유속이 증가함에 따라 난류영역이 잘 발달되기 때문에 곡관하류의 유동특성과 초음파유량계 설치위치와는 서로 밀접한 관계가 있으므로 유효한 유량계 측조건을 충족시키기 위한 곡관후류의 직관거리 설정이 매우 중요하다. 따라서 이에 대한 유효성을 평가하기 위

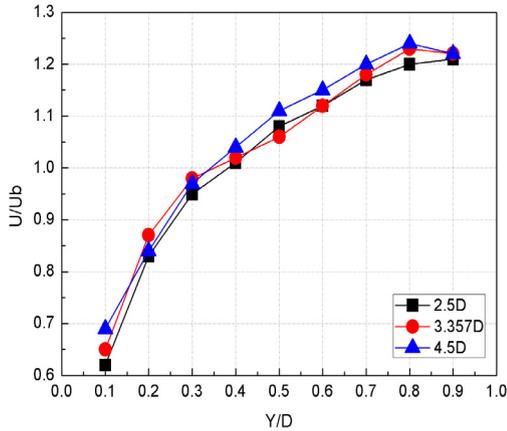


Fig. 11. Velocity profiles of Y axis direction by changing curvature radius at 180° location of bend (Z/D=0.75)

해 곡관후류의 직관거리에 따른 속도의 표준편차를 산출하여 접근할 수 있다. 표준편차(SD)란 면적가중(Area weighted) 평균속도를 산출하여 변화속도분포의 특성을 고찰하는 중요한 척도로서 활용하며, 계산식은 다음과 같다.

$$SD = \sqrt{\frac{\int (u_i - \bar{u})^2 dA}{A}} / \bar{u} \quad (8)$$

여기서, u_i 는 축방향의 국소속도이며, \bar{u} 는 단면에서 평균유속이다. 평균유속은 다음과 같다.

$$\bar{u} = \frac{\int u dA}{A} \quad (9)$$

Fig. 12는 곡관입구의 공기속도를 3, 6, 9.2, 12, 15 m/s로 변화시켰을 때 곡관부에서 180° 위치 곡관하류로부터 연결된 직관거리(L/D)에 따른 표준편차분포를 나타낸 것이다.

그 결과로 유속이 낮은 3 m/s 경우에는 큰 영향을 미치지 않으나, 6 m/s 이상의 유속에서는 표준편차의 폭이 더 크게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 편차가 최소가 되는 점을 고려할 때 대체로 직관거리는 L/D=30영역으로 판단된다. 이 결과는 Rudolf와 Desova[12]의 연구결과와 유사한 특성을 나타내어 이 지점을 유동편차가 안정화되는 지점을 고려한다면 유량 계측시 유효한 측정위

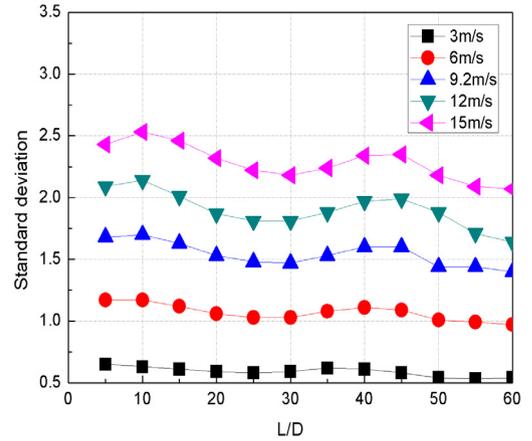


Fig. 12. Standard deviation characteristics according to air inlet velocity from downstream

치로 제시가 가능할 것으로 사료된다.

3.6 수력직경에 따른 직관부의 표준편차분포

Fig. 13은 곡관입구의 공기속도를 9.2 m/s로 일정하게 하고 수력직경을 70, 80, 88.9, 100 mm로 변화시켰을 때 곡관부의 180° 위치 곡관하류로부터 연결된 직관거리(L/D)에 따른 표준편차분포를 나타낸 것이다. 그 결과로 수력직경에 따라 표준편차특성은 동일한 유속조건에서 그다지 큰 차이는 나지 않으며, 최소의 편차영역은 대체로 직관거리 L/D=15~30범위로 판단된다. 따라서 다양한 조건으로 유속 및 수력직경의 변화에 따른 직관거리의 유효한 위치선정을 위해서는 정확한 해석을 통하여 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

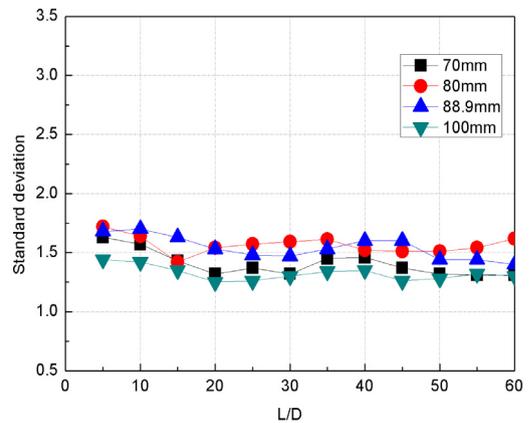


Fig. 13. Standard deviation characteristics according to hydraulic diameter

4. 결론

본 연구에서는 정사각형 단면을 갖는 180° 곡관내 유체의 속도분포특성을 고찰하기 위하여 Chang 등[14]의 실험결과와 비교를 통해 수치해석 방법론의 타당성을 검증하였고, 곡관내의 작동유체, 입구속도, 표면조도, 곡률반경, 수력직경 등의 다양한 유동인자에 따른 속도분포특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) 난류모델의 타당성 검증을 위해 4가지 난류모델을 적용하여 민감도 분석을 수행한 결과로, RSM 난류모델이 실험값과 가장 근사한 해석결과를 나타냈다.
- (2) 작동유체에 따른 속도분포특성은 공기의 경우가 물보다 곡관부의 90° 및 180° 단면위치에서 급격한 속도분포를 나타내었다. 이는 유체의 점성력 차이로 인한 영향으로 사료된다.
- (3) 입구의 공기속도에 따른 속도분포특성은 곡관부의 90° 단면위치에서 $X/D=0.4$ 까지는 상대적으로 낮은 속도분포를 보이다가 그 이후에서는 급격하게 속도가 증가하여 $X/D=0.8$ 영역에서 최대치를 나타냈고, 곡관부의 180° 단면위치에서는 $Y/D=0.1$ 로부터 점증적으로 속도가 증가하여 $Y/D=0.8$ 영역에서 최대치를 나타냈다.
- (4) 표면조도 및 곡률반경에 따른 속도분포특성은 표면조도가 낮고, 곡률반경이 클수록 속도변화율을 다소 크게 영향을 받는다.
- (5) 곡관후류 직관부에서 유속에 따른 표준편차분포특성은 유속이 증가할수록 표준편차의 폭은 더 크게 나타남을 알 수 있었고, 유동편차가 안정화되는 지점은 직관거리 $L/D=30$ 영역으로 판단되며, 동일한 유속에서 수력직경의 변화에 따른 편차분포특성은 최소의 편차영역을 볼 때 대체로 직관거리 $L/D=15\sim30$ 범위로 나타내어 유량 계측시 유효한 측정위치로 제시가 가능할 수 있었다.

References

- [1] J. S. Maeng and J. S. Lee, "Three dimensional turbulent flow analysis in a 90° square sectioned duct with strong curvature", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 11-25, 1991.
- [2] D. H. Koh, D. J. Kang and D. J. Song, "Numerical simulation of the flow characteristics inside a U-type tube", *Journal of Computational Fluids Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 105-141, 2009.
- [3] H. Y. Sohn, H. N. Lee, G. M. Park and H. G. Lee, "A study on the axial velocity profile of development laminar flows in a straight duct connected to a square curved duct", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, vol. 28, no. 9, pp. 1058-1065, 2004.
- [4] H. Y. Sohn, H. N. Lee and G. M. Park, "Axial velocity profiles and secondary flows of developing laminar flows in a straight connected exit region of a 180° square curved duct", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, vol. 29, no. 10, pp. 1092-1100, 2005.
- [5] G. M. Park, T. G. Bong and H. C. Son, "A study on the flow characteristics of developing transitional steady flows in the entrance region of a curved duct", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 33-39, 1999.
- [6] T. K. Bong and D. H. Cho, "A study on the influence of centrifugal force for flow characteristics in square-sectional air duct", *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, vol. 18, no. 5, pp. 455-460, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7837/kosomes.2012.18.5.455>
- [7] I. H. Lim and Y. T. Yoo, "A experimental study on velocity distribution of outlet region in a square duct", *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 1783-1789, 2002.
- [8] S. J. Yang and Y. D. Choi, "A study of turbulent model on the heat transfer in a square duct a 180° bend", *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 43-47, 1992.
- [9] R. W. Johnson, "Turbulent Convecting flow in a square duct with a 180° bend: an experimental and numerical study", *Ph. D. Thesis, University of Manchester*, 1984.
- [10] H. G. Lee, H. C. Son, H. N. Lee and G. M. Park, "Axial direction velocity and wall shear stress distributions of turbulent steady flow in a curved duct", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 131-138, 2001.
- [11] G. H. Lee and J. H. Back, "A numerical study on the flow development around a rotation square-sectioned U-bend (II)", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, vol. 26, no. 6, pp. 850-858, 2002.
- [12] P. Rudolf and M. Desova, "Flow characteristics of curved ducts", *Applied and Computational Mechanics* 1, pp. 255-264, 2007.
- [13] C. Carlander and J. Delsing, "Installation effects on an ultrasonic flow meter with implications for self diagnostics", *Flow Measurement and Instrumentation* 11, pp. 109-122, 2000.
- [14] S. M. Chang, J. A. C. Humphrey and A. Modavi, "Turbulent flow in a strongly curved U-bend and downstream tangent of square cross-sections", *PCH PhysicoChemical Hydrodynamics*, vol. 4, no. 3, pp. 243-269, 1983.

진 정 정(Jing-Jing Chen)

[준회원]



- 2014년 8월 : 가천대학교 기계·자동차공학과 (공학학사)
- 2016년 8월 : 가천대학교 대학원 기계공학과 졸업

<관심분야>

열유체공학, CFD

윤 준 규(Jun-Kyu Yoon)

[정회원]



- 1987년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 명지대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

열유체공학, 자동차공학