

## U-자형 곡관내의 유동특성에 대한 수치해석적 연구

고 동 훈,<sup>1</sup> 강 동 진,<sup>2</sup> 송 동 주<sup>\*2</sup>

## NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW CHARACTERISTICS INSIDE A U-TYPE TUBE

D.H. Koh,<sup>1</sup> D.J. Kang<sup>2</sup> and D.J. Song<sup>\*2</sup>

*A numerical study of the flow characteristics inside a U-type circular tube is carried out in this paper. The numerical simulations carried out by using a Navier-Stokes code which is commercially available. Before detailed numerical simulations, validation of present numerical approach is made by comparing numerical solutions with experimental data.*

*Numerical simulations are performed to study the effect of curvature on the flow characteristics inside a U-type tube. Numerical solutions show that a significant effect on the secondary flow structure in the cross section of the tube, especially in the curved section is shown when the curvature ratio, ratio of curvature to tube diameter, is smaller than about 3.5. As the curvature ratio decreases below 3.5, a counter rotating vortex is found below the primary vortex in the cross section of the tube. Another dramatic change of the flow structure is the formation of streamwise separation zone when the curvature ratio is decreased below 1.25.*

**Key Words :** U-자형 곡관(U-Type Circular Tube), 이차유동(Secondary Flow), 압력강하(Pressure Drop), 수치해석(Numerical Analysis), 난류(Turbulence), Fluent

## 1. 서 론

곡관내 발달되는 난류유동에 대한 연구는 다양한 산업적 응용성으로 인해 많은 연구자들이 관심을 보여왔다. 유동방향으로 곡률을 가지는 곡관(원관 및 사각형 덕트)내 유동은 블레이드 통로, 원심압축기, 원심펌프, 터빈장치의 흡입구나 통풍관, 발전기의 내부냉각통로, 공장들의 파이프 시스템, 열교환기의 냉각코일, 생체순환기 동맥 및 정맥과 같은 혈류시스템 등과 같은 전형적인 기계공학응용 분야와 선박유체역학 분야에서 광범위하게 널리 활용되고 있으며, 이에 대한 폭넓은 이해는 설계를 위한 필수불가결한 요소로 실험적 혹은 수치적 연구가 활발히 진행되어 왔다.

곡관에 대한 최근까지의 국내·외 연구동향을 살펴보면 다

음과 같다.

Thomson[1]은 곡면을 따라 흐르는 유동의 원심력과 경계층영역내 느린 유동간의 상호작용으로 2차유동이 발생된다고 처음으로 제안하였고, Eutice[2]는 염색된 물을 곡관부의 상류에 투입하는 실험으로, 2차유동의 존재형태를 설명하였다. Dean[3,4]은 이러한 유동을 수학적으로 분석하여, 유동을 좌우하는 무차원변수(Dean number)를 정의하였다. 이들 연구는 곡관을 지나는 유동의 기본적인 특징을 이해하는 기초는 제공하였으나, 실제 응용에 적용 가능한 상세한 설명은 제공하지 못하였다.

1970년대 이후, Metha 등[5]은 원형단면 곡관에서 층류유동의 열전달 계수를 연구하였고, Yiannekis 등[6]은 90°곡관에서 Laser-Doppler에 의한 방법으로 2차유동을 확인하였고, Johnson[7]은 사각단면을 갖는 180°곡관내의 유동을 수치적으로 연구하였다. Chang 등[8]은 사각단면 곡관에서의 유체유동과 열전달을 연구하였다. 사각단면의 곡관내 발달되는 난류유동에 대한 많은 실험적 연구가 진행되었으며, 상당한 실험자료들이 제공되어 2차유동과 복잡한 난류 특성이 이해되었다. 이들 실험연구에서 사용된 측정장치로 열선유속계나

접수일: 2009년 7월 21일, 수정일: 2009년 8월 28일,

게재확정일: 2009년 9월 11일.

1 학생회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 영남대학교 기계공학부

\* Corresponding author, E-mail: djsong@yu.ac.kr

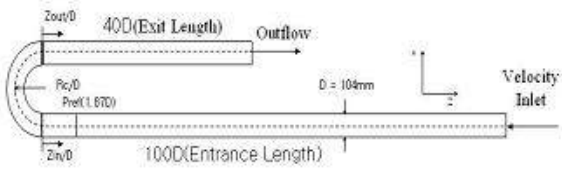


Fig. 5 Schematic diagram of 180° curved circular duct

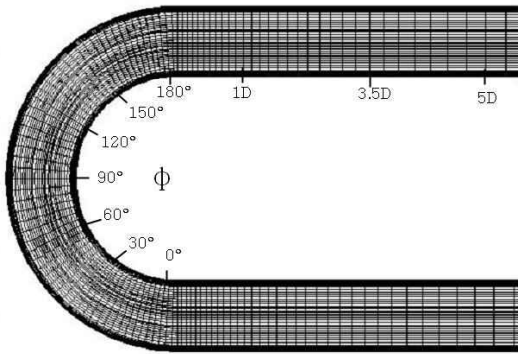


Fig. 2 Grid (Top View) and Data Point

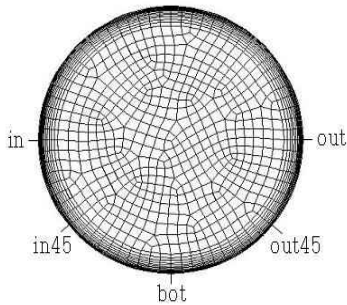


Fig. 3 Grid (Cross Section) and Data Point

LDA(Laser Doppler Anemometer)가 사용되었다.

손현철 등[9]은 정사각 180° 곡관 덕트에서 열선 유속계와 LDV를 이용한 천이 맥동유동의 임계 Dean수와 유동특성에 관한 연구를 하였다. 맹주성 등[10]은 정사각단면을 갖는 90° 곡관의 층류유동을 연구하였다.

반면 원형 단면의 곡관 내 유동은 단면이 사각인 곡관 내 유동에 비해 그 적용범위가 광대하지만, 실제실험장치의 제작이나 측정상의 어려움 때문에 이에 대한 실험적 연구는 상대적으로 적으며, 기존의 일부 연구들도 대부분 원형단면의 90° 곡관에 대한 열전달과 층류유동에 대한 연구들이 대부분이었다.

원형단면을 갖는 180°굽은 곡관내 난류유동에 대한 실험적

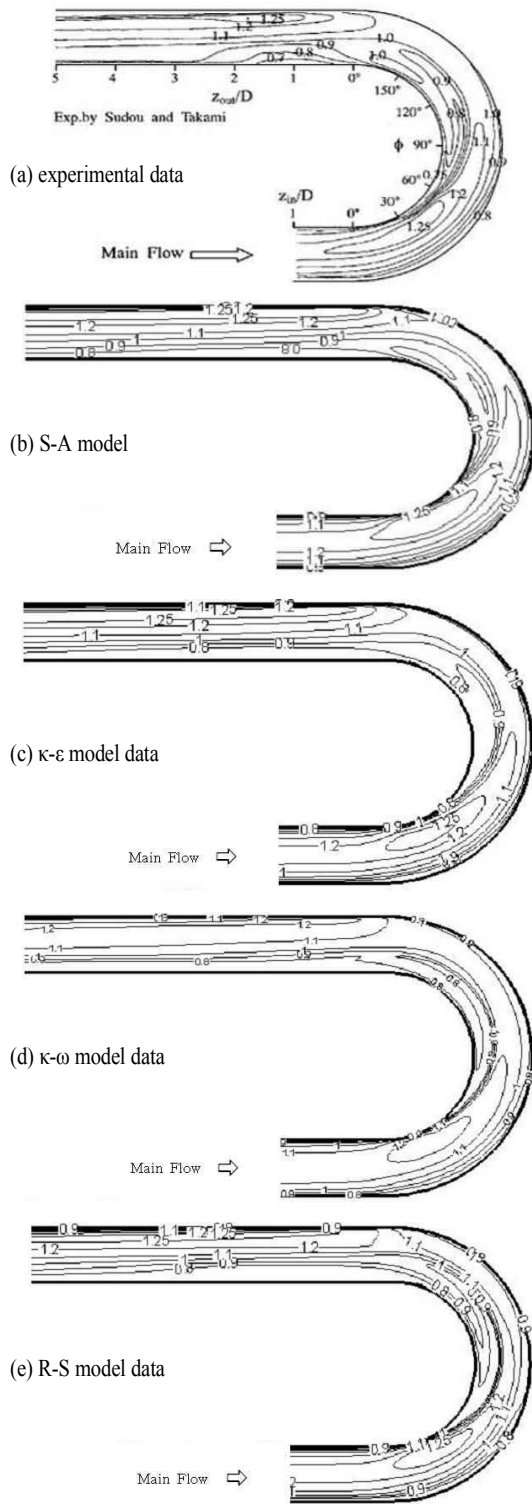
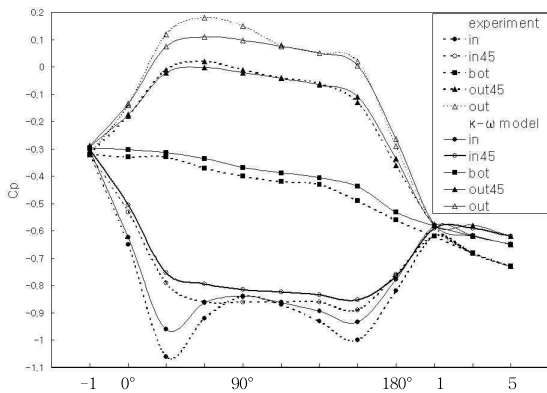
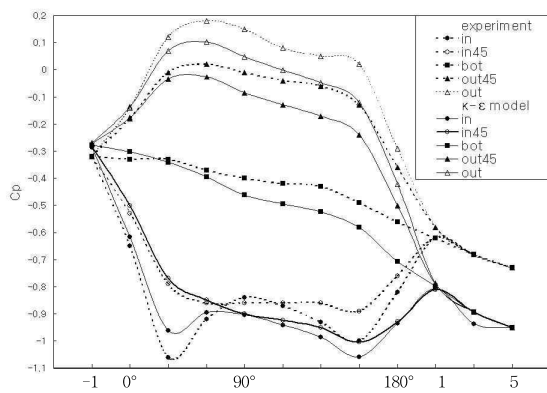


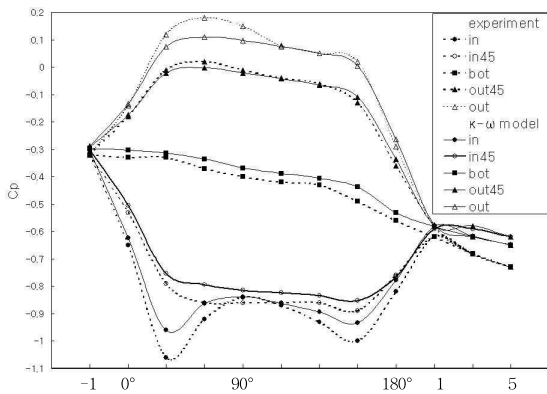
Fig. 4 Comparison of streamwise mean velocity contours



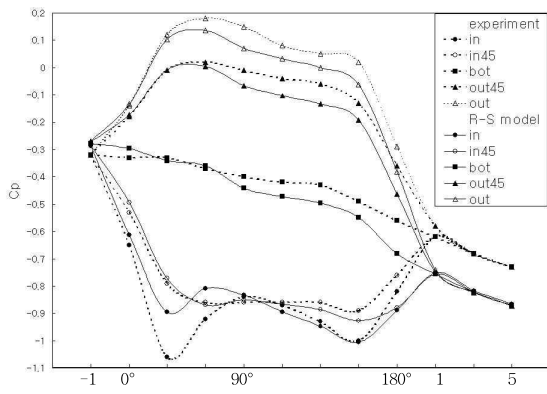
(a) S-A model with experimental data



(b) κ-ε model with experimental data



(c) κ-ω model with experimental data



(d) R-S model with experimental data

Fig. 5 Comparison of the pressure along the curved section of the tube

연구는 Rowe[11]에 의해 열선유속계를 사용하여 실험 데이터를 제공한 바 있다. Azzola 등[12]은 LDA를 사용하여 곡률반경방향에 수직인 방향에 대한 속도의 2성분 및 레이놀즈 응력의 2성분만을 측정하였으며, 국내에서도 최 및 이[13]는 열선유속계를 사용하여 보다 많은 실험결과를 얻었다. 그러나 곡관내 유동장을 완전히 이해하기에는 아직 실험결과가 부족한 상황이므로, 향후 수치해석 방법 및 난류모형의 평가를 위해서도 곡관내의 여러 위 치에서 발생하는 벽면 근방 및 대칭 단면을 포함하여 주유동 방향에 수직인 단면 전체에 대한 난류속도장 및 레이놀즈 응력과 같은 난류 유동장 특성을 제시하는 보다 신뢰성 있는 실험결과가 요구된다.

본 연구에서는 원형단면을 갖는 180° 굽은 곡관내의 난류 유동에서 곡률반경이 곡관내 이차유동에 미치는 영향을 곡관 내부유동에 미치는 영향을 3차원 상용코드인 Fluent를 사용하여 수치해석 하고자 한다. 특히 주유동방향에 수직인 단면에

서의 이차 유동장 형태를 자세히 분석함으로써 급격히 굽은 원형 단면을 가지는 곡관 내에서의 복합유동현상을 이해하고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 계산 모델의 형상

본 연구에서는 180° 굽은 원형 단면 곡관내의 유동을 수치해석하기 위해 Fig. 1과 같은 기하학적 형상을 선택하였으며, 이 형상은 Sudou 등[14]이 실험한 형상과 동일하다. 수치해석은 관의 직경 D와 평균 주유동방향 속도 U를 기준으로 정의된 레이놀즈 수(Reynolds number)가 60,000인 경우에 곡관의 평균 곡률반경비 Rc/D를 8, 3.5, 2.5, 2, 1.5, 1.25, 1, 0.9, 0.75와 같이 9가지로 바꾸어 가며 수행하였다. 수치해석에 사용된 격자수는 약 30-60만개이다.

수치해석에 사용된 계산 영역은 곡관의 상류영역 즉, Upstream Pipe가 직경의 100배, 곡관의 하류인 Downstream Pipe는 직경의 40배로 하였다. 유체는 공기로 가정하고, 입구에서 균일한 입구유속으로 유입된다고 가정하였다. 관내 벽면에서는 no-slip 조건을 적용하였다. 본 연구에서 참고한 Sudou의 실험 논문에서는 실험장치의 하류영역이 40D까지였고, 그 이후는 외부로 빠져나가게 된다. 그래서 본 연구에서는 Sudou의 실험 장치와 동일하게 곡관의 하류영역을 40D로 설정하고 외기로 빠져나가는 조건을 주어 연구를 수행하였다.

## 2.2 격자 생성

Fig. 2,3은 본 연구에서 사용된 격자의 일부를 나타내었고, 유동의 변화가 심하게 변하는 구간에 격자를 집중시켜 수치해의 신뢰도를 향상하였다.

입구의 원형단면에서 중심에서부터 사각형격자를 생성한 후 관중심축을 따라 적층하여 프리즘으로 구성된 격자를 생성하였고, 굵은 곡관을 기준으로 조밀하다가 양끝 즉, 입구와 출구에 해당되는 영역에 이르러 격자점간의 간격이 넓어지는 비등간격의 격자 형태를 취하였다. 또한, 본 연구에 사용된 격자의 무차원 길이( $y^+$ )는 1 이하로 생성하였다.

참고로 본 연구에서 대상으로 한 유동만을 고려하는 경우, 유동의 대칭성을 고려하여 원형 단면적의 절반만을 계산영역으로 취해 정렬격자를 사용하는 것이 더 경제적인 수도 있다. 그러나 일반적인 곡관유동 해석을 위해서는 원형 단면전체 영역을 대상으로 해야 하는 수치해석의 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. 3에서 나타난 바와 같이 비정렬 격자를 사용함으로써 원형 단면 전체영역을 대상으로 하면서도 특이점을 포함시키지 않고, 격자의 찌그러짐도 거의 없앨 수 있었다.

Fig. 2에서  $\phi=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 1D, 3.5D, 5D$  위치에서 데이터를 추출하여 실험 데이터와 비교하였다. 또한 유동은 대칭조건이지만, 본 연구에서 사용된 수치해석 방법이 격자의 비대칭성에 무관하게 대칭유동을 형성함을 입증하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 원관 전체 단면에 대하여 해석하였으며, 곡관 안쪽(이하 in), 곡관 안쪽과 바닥의 중간(이하 in45), 바닥(이하 bot), 바닥과 바깥쪽 중간(out45), 바깥쪽(out)에 대하여 데이터를 추출하였다.

## 2.3 난류모델 및 수치해석 방법

본 연구에서 사용된 Spalart-Allmaras model(이하 S-A model)은 벽면 근처에서 Turbulence Kinematic Viscosity를 해석한다.

또한 박리를 수반하는 유동에서도 예측능이 크게 저하되지 않는 것으로 알려져 있으며, 계산 속도면에서 기존의 Two-Equation Model과 비교해 보았을 때 월등한 수렴속도를 보여주고 있어 3차원 계산시에 계산 시간 단축 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서 난류모델의 평가를 위해 Launder-Sharm의  $k-\epsilon$  모델, Wilcox의  $k-\omega$  모델, Reynolds Stress 모델(이하 R-S model), S-A model을 사용하였다.

수치해석의 수행방법은 수렴성, 정확성과 타당성이 검증되고 있는 FLUENT 6.2사용하였다. 그리고 격자수에 대한 계산 결과의 의존성을 검토하고, 각 형상에 따라 30~60만개의 격자수를 가지고 계산하였다.

수렴조건은 계산의 정확도를 높이기 위하여 잉여값(residual)의 크기가 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식에 대해서  $10^{-5}$ 일 경우에 수렴하는 것으로 하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 난류모델 비교

본 연구에서는 U-자형 곡관내의 유동특성에 대한 자세한 수치해석적 연구에 앞서 4가지 난류모델을 사용하여 얻은 수치해를 Sudou 등[14]의 실험치와 비교하여 난류모델의 예측성을 평가하였다.

4가지 난류모델 결과를 실험치와 비교하여 보면, 전체적 유동특성은 대체로 일치하지만, 곡관부의 최대치와 최소치 등의 크기는 S-A model 결과가 가장 좋은 일치를 보임을 알 수 있다. Fig. 4는 4가지 난류모델별로 수치해석한  $u/U$  속도비의 분포이다. 그림을 비교하면 곡관부에서의 속도비는 S-A model이 대체로 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 곡관부에서 정압력분포를 비교하여 도시한 그림이다. 그림을 비교하면 곡관부에서의 압력강하를 S-A model만이 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. S-A model은 최대 유속의 위치나 크기 등을 대체로 정확히 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 S-A 난류모델을 사용하여 이하 모든 수치해석을 수행하였다.

### 3.2 곡률반경비가 이차유동에 미치는 영향

곡률반경비  $Rc/D$ 가 곡관내의 이차유동에 미치는 영향을 살펴보기 위해  $Rc/D=0.65\sim 8$  범위에서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 6은  $Rc/D=8$ 인 경우에 얻은 수치해로 주요 단면에서의 이차유동 특성을 잘 보여준다. 곡관의 원심력에 의한 이차유동은  $\phi=30^\circ$  부근에서 발생하여 하류로 대류되는 전형적인 곡관 유동 특성이 관찰되었다. 이러한 이차유동 특성은 곡률반경비  $Rc/D=3.5$ 부근까지 관찰되며(Fig. 7 참조),  $Rc/D=3.5$ 인 경

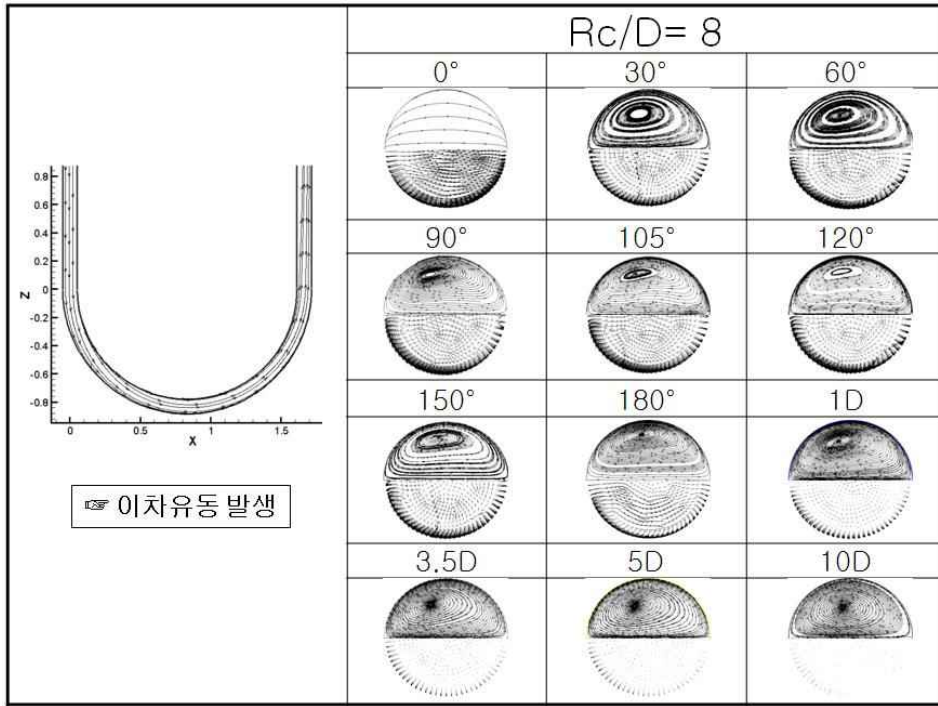


Fig. 6 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=8$ )

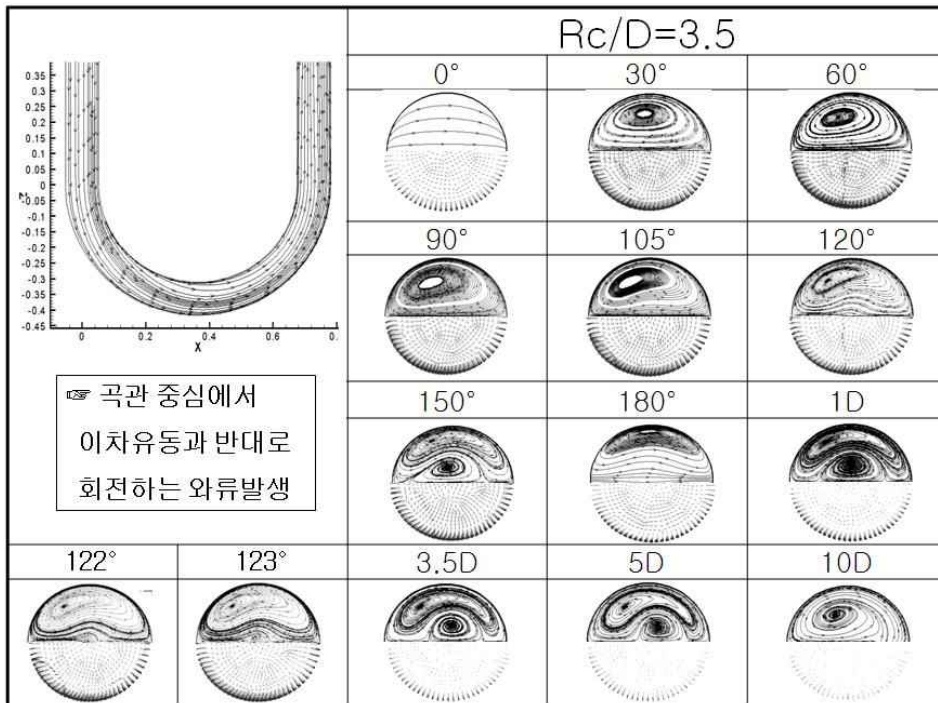


Fig. 7 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=3.5$ )

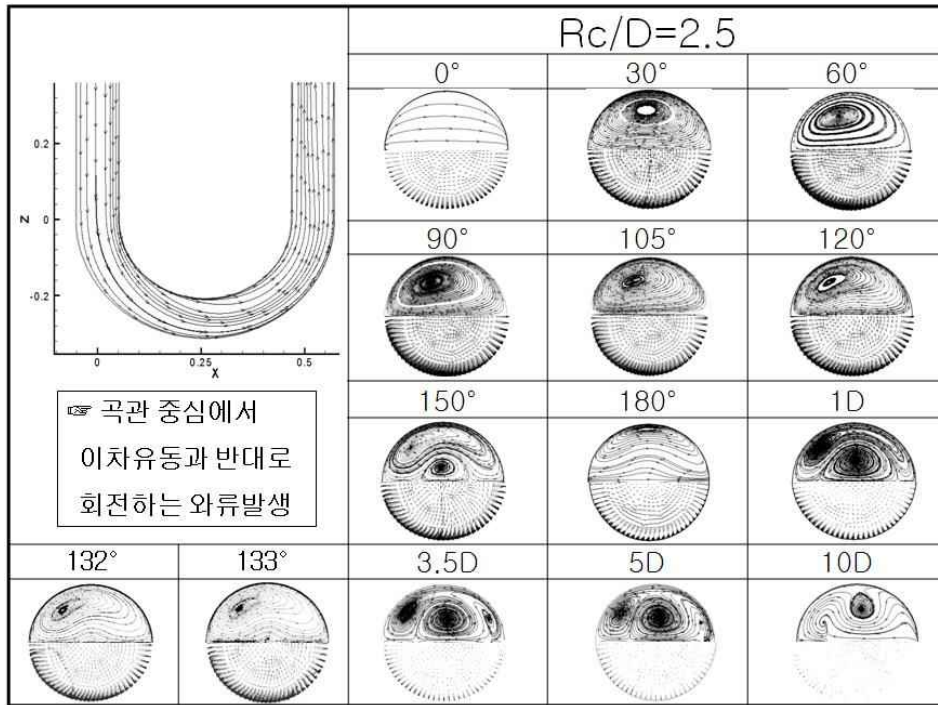


Fig. 8 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=2.5$ )

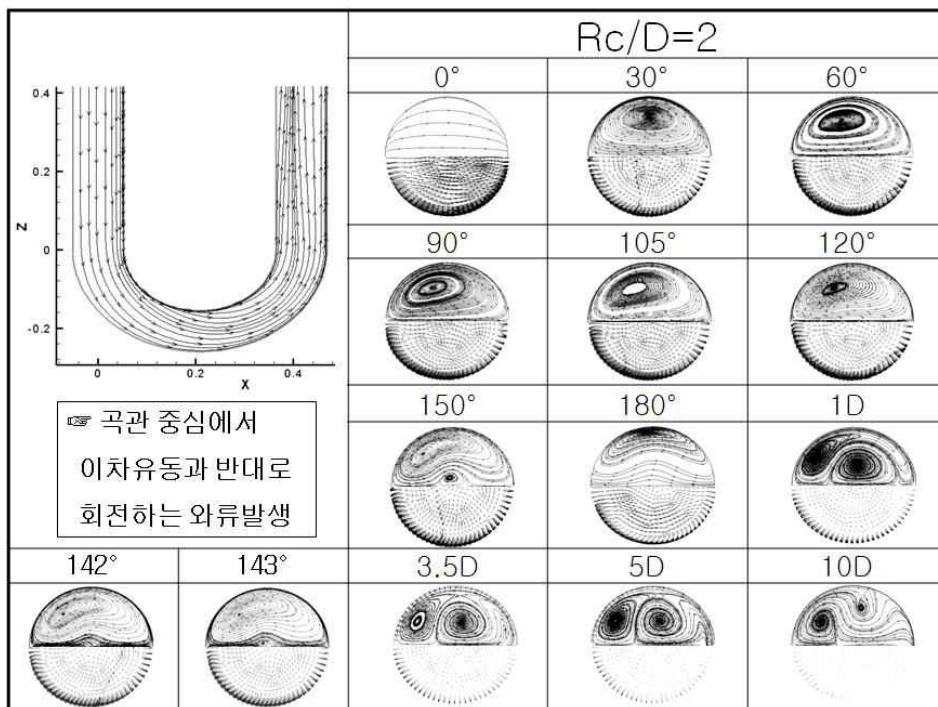


Fig. 9 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=2$ )

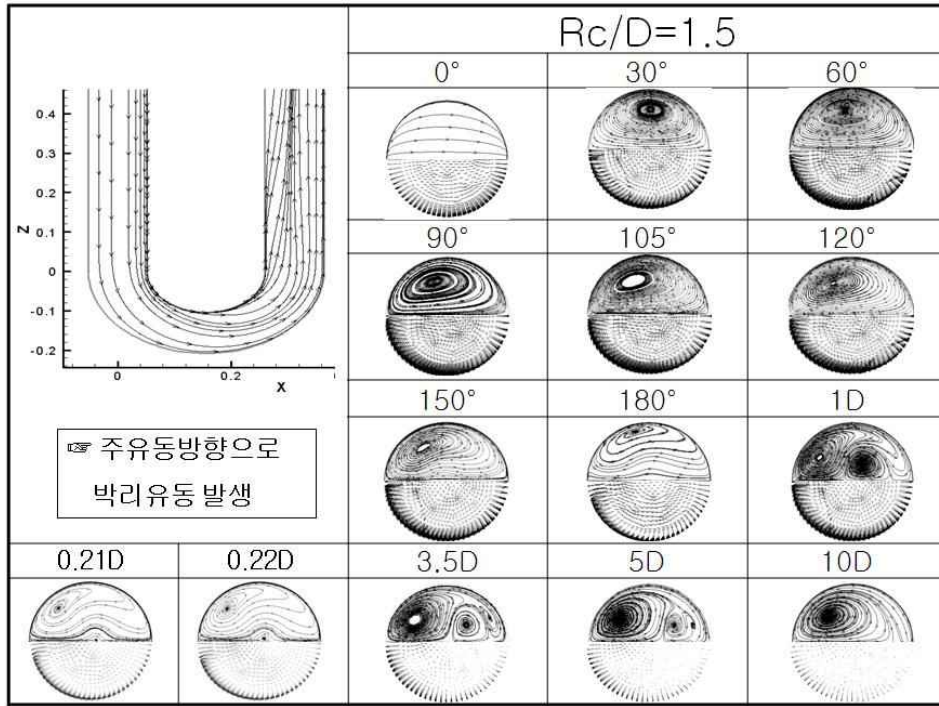


Fig. 10 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $R_c/D=1.5$ )

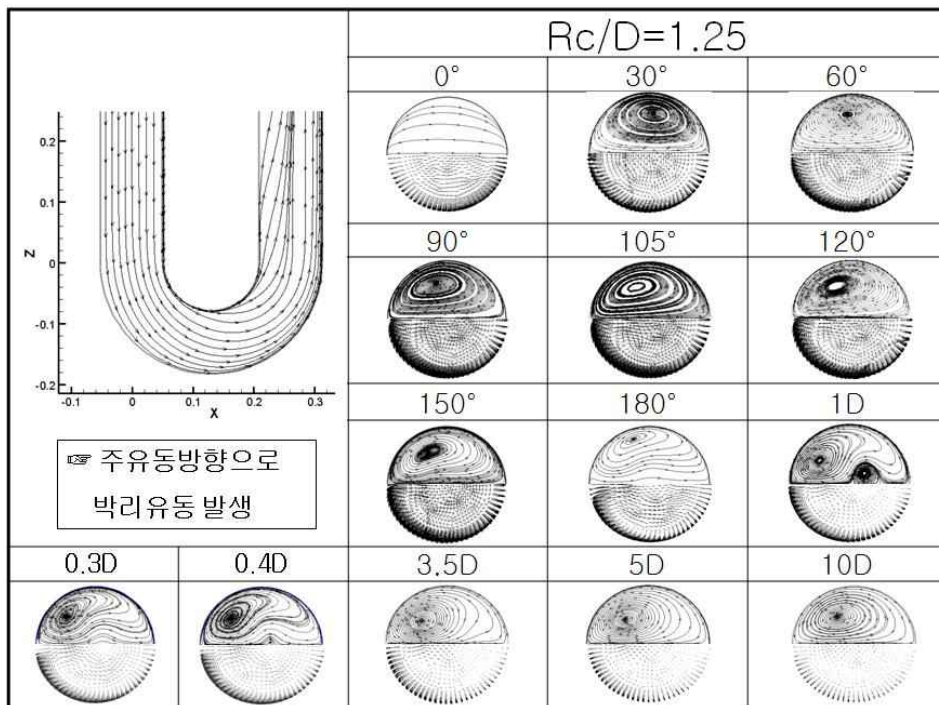


Fig. 11 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $R_c/D=1.25$ )

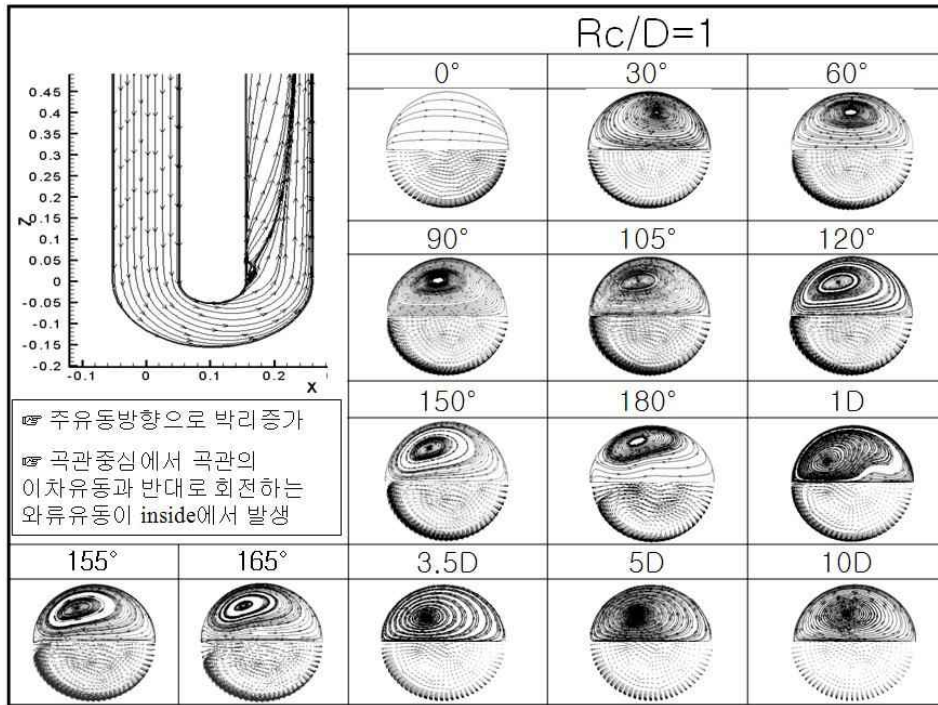


Fig. 12 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=1$ )

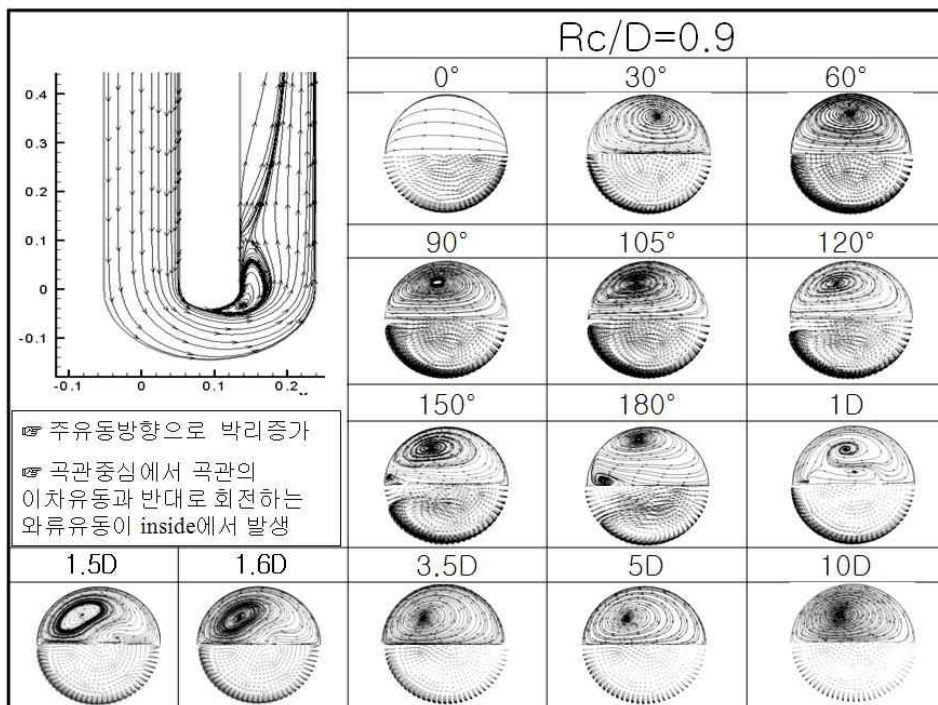


Fig. 13 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=0.9$ )



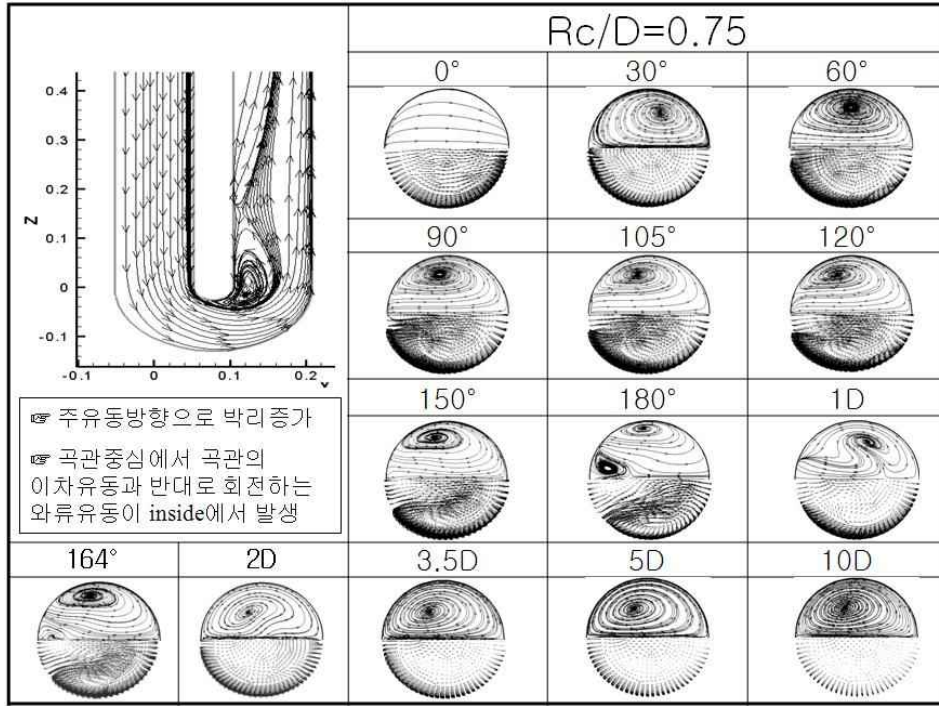
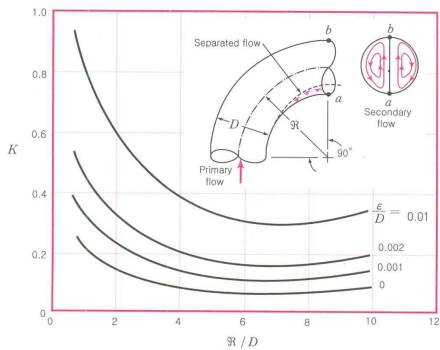
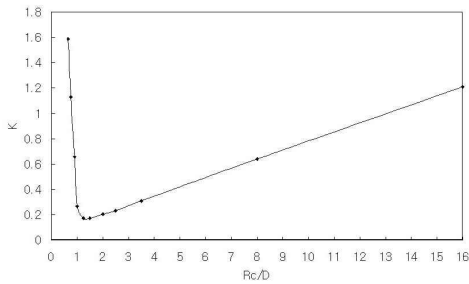


Fig. 14 Velocity vectors and streamlines at several locations ( $Rc/D=0.75$ )



(a) 90° Circular Tube( $K_{min}: Rc/D=7$ )



(b) U-Type Circular Tube( $K_{min}: Rc/D \approx 1.5$ )

Fig. 15 Loss coefficient variation vs curvature ratio( $Rc/D$ )

우  $\phi=122^\circ \sim 123^\circ$  영역에서 vortex가 쌍을 이루며 형성되었다. 이와 같은 vortex pair는 Azzola et al. 실험에서도 관찰되었다.

곡관부에서의 복잡한 vortex pair 유동특성은 Fig. 8의  $Rc/D=2.5$ , Fig. 9의  $Rc/D=2.0$ 에서도 관찰되었으며, Fig. 10에 도시한  $Rc/D=1.5$ 부터 새로운 이차유동 특성이 관찰되기 시작하였다. 즉 곡관 단면에서의 이차유동이 관찰되는 전형적인 유동특성과 달리  $Rc/D=1.5$ 인 경우는 곡관을 따라 주 유동방향으로의 박리유동이 형성됨에 단면에서의 이차유동도 크게 달라졌다. 곡률반경비  $Rc/D$ 가 1.5보다 작아지면 곡관 벽면을 따라 주 유동방향으로 박리유동이 형성되며(Fig. 11-14참조), 이에 따라 앞서 서술한 vortex pair는 사라지고 하나의 vortex가 관찰된다. 그러나 곡관부를 지나 하류에서는 박리유동이 사라짐에 따라 vortex pair가 다시 관찰되는 복잡한 유동특성이 보인다. 이와 같은 복잡한 박리유동과 이차유동과의 연관성은 Fig. 13의  $Rc/D \approx 0.9$ 까지 관찰되어지며,  $Rc/D=0.9$ 이하부터는 주 유동방향으로의 유동박리에도 불구하고 곡관단면에서 vortex pair가 관찰된다. 이는 과도한 원심력 작용이 원인으로 판단된다. Fig. 15는 곡관부에서의 손실계수를 도시한 그림으로 곡률반경비  $Rc/D \approx 1.5$ 부근에서 최소치를 가짐을 알 수 있다. 여기서 손실계수  $K$ 는 곡관부의 시작과 끝부분의 압력차에 대한 무차원수로 정의하였다. 손실계수가 최소가 되는 이 곡률반경비는 앞서 서술한 바와 같이 곡관벽면을 따라 주

유동방향으로의 박리유동이 관찰되기 시작하는 경우이다. 또 90° 굽은 원형관의 경우는  $Rc/D=7$ 에서 압력손실이 최소치를 가지는 것으로 알려져 있어, 곡관부의 크기에 따라 곡관부 압력손실이 큰 영향을 받음을 짐작할 수 있다.

본 U-자형 원형곡관에 대한 유동특성에 대해 자세히 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 곡률반경비가 3.5부근부터 곡관단면에서 vortex pair가 관찰되었다.
2. 곡률반경비가 1.5보다 작아질 경우 이하에서 주 유동방향으로 박리유동이 발생하였고, 단면에서의 박리유동이 이차유동 특성에 큰 영향을 미쳤다. 특히 곡률반경비  $Rc/D \approx 1.5$ 에서 압력손실이 최소가 되었다.
3. 주유동방향으로 박리유동이 형성되더라도 불구하고, 곡률 반경비  $Rc/D=1.25$ 이하에서는 단면에서 vortex pair가 관찰되었다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 BK21 지역우수대학원 육성사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 1876, Thomson, J., "On the Origin of Winding of River in Alluvial Planic, with Remarks on the Flow of Water Round Bend in Pipe," *Proc. K. Soc. London Ser. A25*, pp.5-8.
- [2] 1911, Eustice, I., "Flow of Water in Curved Pipes," *Proc. R. Soc. London, Series A*, Vol.85, pp.119-131.
- [3] 1927, Dean, W.R., "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Philos. Mag.*, Vol.20, pp.208-223.
- [4] 1928, Dean, W.R., "The Streamline Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Philos. Mag.*, Vol.30, pp.673-693.
- [5] 1981, Metha, N.D. and Bell, K.J., "Laminar Flow Heat Transfer in a Tube Preceded by a 180° Bend," *Heat Transfer-Soviet Research*, Vol.103, No.6, pp.71-80.
- [6] 1982, Enayet, M.M., Gibson, M.M., Taylor, A.M., K.P. and Yianneskis, M., "Laser-Doppler Measurements of Laminar and Turbulent Flow in a Pipe Bend," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol.3, No.4, pp.213-220.
- [7] 1988, Johnson, R.W., "Numerical Simulation of Local Nusselt Number for Turbulent Flow in a Square Duct with a 180° Bend," *Numerical Heat Transfer*, Vol.4, pp.205-228.
- [8] 1988, Chang, S.M., Humphrey, J.A. and Modavi, A., "Turbulent Flow in a Strongly Curved U-Bend and Downstream Tangent of Square Cross Section," *PCH Physico Chemical Hydrodynamics*, Vol.4, pp.243-253.
- [9] 1999, Son, H.C., Bong, T.K., and Park, K.M., "정사각 180° 곡관덕트에서 열선 유속계와 LDV를 이용한 천이 맥동유동의 임계 Dean수와 유동특성에 관한 연구," *대한기계학회 춘계학술대회논문집 B*, pp.218-223.
- [10] 1991, 맹주성, 류명석, 양시영, 장용준, "직사각형 단면을 갖는 90° 곡관 내의 3차원 난류유동에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집*, 제15권, 제1호, pp.262-273.
- [11] 1970, Rowe, M., "Measurement and computations flow in pipe bends," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.43 pp.771-783.
- [12] 1986, Azzola, J., Humphrey, J.A.C., Iacovides, H. and Launder, B.E., "Developing Turbulent Flow in a U-bend of Circular Cross Section: Measurement and Computation," *J. Fluid Eng.*, Vol.108, pp.214-221.
- [13] 1998, Choi, Y.D. and Lee, G.H., "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.
- [14] 1992, Sudou, K. and Takami, T., "Turbulent flow of 180° bend with circular cross section," *Turbo Machinery*, Vol.20-12, pp.33-38(in Japanese).