

정방형 공기덕트 내부의 유동특성에 원심력이 미치는 영향에 관한 연구

봉태근* · 조대환**†

*, ** 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Study on the Influence of Centrifugal Force for Flow Characteristics in Square-sectional Air Duct

Tae-Keun Bong* · Dae-Hwan Cho**†

*, ** Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 이 연구에서는 정사각 단면을 갖는 덕트 내부에 원심력의 영향을 받는 유동의 천이특성을 실험 및 수치적으로 규명하였다. 실험적 연구로서 레이저도플러 속도계를 이용하여 축방향속도를 측정하였고, 상용소프트웨어인 플루언트를 이용한 전산유체 시뮬레이션으로 천이특성을 고찰하였다. 유동의 발달은 단수와 굽힘각에 의존한다는 사실을 알 수 있었으며 덕트의 중앙에서의 속도분포는 원심력 때문에 내외벽보다 낮은 값을 나타내었다.

핵심용어 : 전산유체역학, 단수, 속도분포, 원심력, 정방형 덕트

Abstract : In this paper, an experimental and numerical investigation of transition characteristics in a square-sectional curved duct flow under Centrifugal force is presented. The experimental study is carried out to measure axial velocity profiles by using Laser Doppler Velocimeter (LDV) system. Computational fluid dynamic (CFD) simulation was performed using the commercial CFD code FLUENT to investigate the transition characteristics. The flow development is found to depend upon Dean number and curvature ratio. The velocity profiles in center of the duct have lower value than those of the inner and outer walls because of the centrifugal forces.

Key Words : Computational fluid dynamic, Dean number, Velocity profiles, Centrifugal forces, Square-sectional duct

1. 서 론

해양플랜트에 설치되는 공기조화시스템은 일반 화물선의 공조기에 비해 설비의 특성상 대형화되고 있으며 고부가가치를 갖고 있다. 그리고 탱커의 펌프실이나 차량운반선의 화물공간과 같이 환기가 필요한 경우나 거주구에서의 쾌적성의 중요성이 커짐에 따라 선주들의 기술적인 요구도 늘어나고 있는 추세이다. 또한 해상용 공조시스템의 제품이 다양해지고 시장규모가 증가함에 따라 설계에 반영되는 제반 요소들도 고성능화 및 정밀화 되는 복잡한 양상을 나타

내고 있다. 덕트시스템의 최적 설계는 공기조화 시스템의 효율에 따른 경제성 뿐만 아니라 신뢰성과 안정성과도 밀접한 연관이 있다. 관로에서 덕트유동의 기존 연구가 시작된 것은 19세기 말이며 대상은 곡관 내부의 유동특성이었다. 실제로 관로내부의 유동특성을 고찰하여 설계에 반영하는 공학적인 연구는 계측기기의 정밀도에 따라 발전되어왔다. 덕트유동에 대한 유동특성이 규명되기 시작한 것은 열선유속계와 레이저유속계 등 정밀 측정장비가 개발된 이후이며 컴퓨터를 기반으로 한 수치모사(Lee, 2012)와 입자영상유속계와 관련된 기술(장, 2010; 이, 2009)이 비약적인 발전에 많은 영향을 받게 된다. Hille et al.(1985)은 레이저유속계를 이용하여 단수와 굽힘각을 변수로 하여 축방향속도

* 대표저자 : 정희원, tgbong@mmu.ac.kr, 061-240-7211

† 교신저자 : 정희원, dhcho@mmu.ac.kr, 061-240-7217

와 2차유동 속도를 측정하였다. Aoyama et al.(1989)은 3가지의 곡률반경에 대한 열선유속계에 의한 실험으로 난류에너지와 레이놀즈응력은 난류발생이 최대로 되는 중심영역에서 최대가 된다고 발표하였다. Takami et al.(1989)은 단수와 곡률반경비를 변경하면서 LDV를 사용해서 축방향속도 성분을 측정하고 수치해석을 하여 압력구배과정의 변화 등 유동의 내부구조를 고찰하고 진동수와 유량비가 유동에 미치는 영향에 대해 발표하였다. 을 규명유동의 특징을 밝혔다. Bong and Park(2000)은 정사각단면을 갖는 180° 곡관덕트의 출구측인 120°, 150°, 180° 지점에서 LDV시스템을 이용하여 속도를 계측하고 실험적 연구를 수행하였다. 유동영역을 분류하여 임계단수를 결정하였으며, 천이정상유동의 축방향 속도분포를 측정하여 180° 곡관덕트의 입구영역에서 단수와 곡관덕트의 굽힘각이 축방향속도분포에 미치는 영향과 유동특성을 규명하였다. 손(2005)은 곡관덕트에 연결된 정사각 단면 직관 덕트에서 층류정상유동의 유동장내 유동특성에 대해 발표하였다.

2. 실험 및 수치해석

실험장치의 주요부는 180° 곡관덕트, 무풍장치, 서지탱크 송풍기 등으로 구성되어 있다. 덕트에 유입되는 공기는 입구의 무풍장치를 통하여 유입되도록 실험장치를 구성하였다. 이장치는 덕트로 공기가 유입 할 때 난류성분을 최대로 억제 시키는 목적으로 설치하였다. 곡관덕트 입구측에 연결된 직관덕트는 한번의 크기가 40 mm인 정방형 단면에 길이 4,000 mm로 아크릴로 제작하였다. 직관덕트에 연결되는 곡관부의 곡률반경은 400 mm이고 직관덕트와 단면크기가 같도록 180°의 곡관덕트를 아크릴로 제작하여 연결하였다. 곡관덕트의 출구측에는 입구측과 같은 직관덕트를 연결하여 실험유동장을 제작하였다.

곡관덕트내의 축방향유동과 2차유동의 측정은 LDV를 이용하였다. 이 LDV 시스템은 최대출력 2W인 아르곤-이온 레이저를 이용하였으며, 2중빔 형식으로 광학계의 배치하였다. LDV 계측방식은 2색 3빔 방식의 후방산란형이고, LDV 시스템을 적재하여 이동하기 위하여 3차원 이송장치를 설치하여 이용하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 곡관덕트의 좌표계는 Fig. 2(a)에 각각 나타내었다. 천이정상유동은 송풍기에 의하여 공기를 흡입하여 시험덕트내로 유입하도록 하였고 시험관의 유속조절은 유량제어밸브 또는 송풍기를 구동하는 변속모터의 회전수를 조절함으로써 유속을 변화시켰다. 산란입자로는 입자 크기가 0.1~0.3 μm인 모기향 연기를 사용하였다.

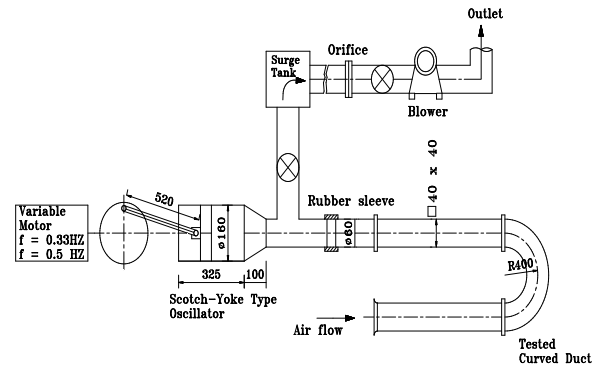


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

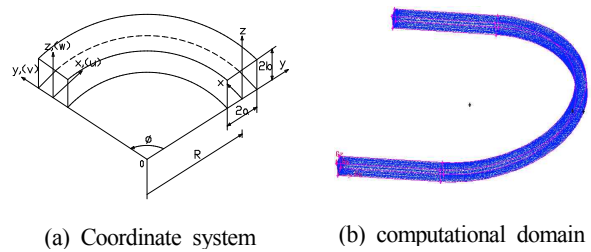


Fig. 2. Coordinate system and computational domain in a curved duct.

천이정상유동의 실험범위는 덕트 중심에서 열선으로 나오는 신호가 열선유속계를 지나 광기록계에 기록된 속도와 형을 고찰하여 최초의 난류버스트가 발생하는 곳으로부터 완전한 난류가 형성되는 부근까지를 천이유동영역으로 규정하고 그 영역에서 실험을 하였다. 본 실험에서는 단수를 460과 530으로 하여 측정하였고, 유량은 오리피스로 측정하여 이로부터 단면평균속도를 구하여 단수를 계산하였다.

측정위치는 180도 곡관중에서 120°, 150°, 180°, 30° 등간격으로 3 지점만을 측정하였다. 곡관덕트내에서 천이정상유동의 유동특성에 대한 유동형태를 정확히 고찰하기 위하여 z 방향보다는 y 방향의 속도분포가 곡관의 굽힘 때문에 심한 변화를 보일 것으로 예상되어 z 방향은 7 지점, y 방향은 16 지점을 측정하였다. 천이정상유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 시그널 프로세서를 거쳐 PC에서 FIND 소프트웨어에 의하여 속도 값으로 처리되어 데이터 파일로 저장하였다. Table 1은 천이정상유동의 실험조건을 나타낸 것이다.

유동장 수치해석은 상용코드인 FLUENT(Ver. : 6.3)를 사용하였다. 속도와 압력의 커플링과 이산화는 SIMPLE해법과 1차 Upwind scheme을 을 사용하였다. 수치시뮬레이션은 연속방정식 및 각 방향 속도의 값을 계산하고 초기 값과 오차

정방향 공기덕트 내부의 유동특성에 원심력이 미치는 영향에 관한 연구

의 범위를 제한함으로써 수렴과정을 확인하였으며 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델이다. Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 계산에 적용된 좌표계의 배치와 계산영역이다. 경계조건은 입구면, 출구면, 벽에 각각 속도, 압력 조건을 부여하였고 벽면은 No slip, 공간내부에는 연속체 조건을 주었다.

Table 1. Experimental condition

Angle	DE_{st}	Radius of curvature(mm)
120°	460	400
	530	
150°	460	400
	530	
180°	460	400
	530	

3. 결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 곡관덕트에서 무차원 횡단면 위치인 y 방향에 따른 축방향 속도분포를 덕트 중심에서의 속도(U_{cl})로 나누어 곡관덕트의 굽힘각 (ϕ)에 따라 무차원화하여 나타낸 것이며 Fig. 5는 곡관의 출구영역의 계측결과이다. 곡관덕트의 유체유동은 하류방향으로 진행함에 따라 점성의 영향을 받는 영역과 받지 않는 영역이 존재하며, 입구영역에서 유체가 하류방향으로 진행하면 입구에서부터 경계층이 발달하지만 질량유량은 항상 같아야 하므로 중앙에서의 속도는 증가되는 반면에 벽면근방의 속도는 감소된다. 이것은 유체가 포물선의 속도분포로 곡관에 유입하면 단면의 중심부분에서 원심력이 최대가 되고 이것이 유체의 점성마찰이나 압력과 균형을 유지한 축방향 속도분포를 형성하기 때문이다. 또한 곡관덕트의 입구 유동영역은 경계층영역과 경계층 밖의 영역으로 분류되며 단수가 증가하면서 압력구배와 점성력으로 인하여 층류유동은 천이유동상태를 거쳐 난류유동으로 변하게 되며 덕트의 모서리효과(Corner effect)는 긴 타원형 형식이기 때문에 국소효과만이 존재한다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 $Dst=460$ 인 경우의 결과이다. $\phi = 120^\circ$ 를 지나면서 곡관의 영향으로 관 상층부를 제외한 대부분 관내의 최대속도가 내벽 측으로 옮겨감을 관찰할 수 있다. 특히 곡관덕트의 굽힘각 $\phi = 150^\circ$ 지점의 속도 분포에 원심력의 영향이 잘 나타나 있으며, Fig. 5(a)와 관련하여 보면 외벽측의 속도가 최대로 바뀌어 곡관의 출구측인 180° 부근에서는 곡관의 영향이 약해지면서 유동 자체가 거의 안정되어 좌우가 대칭인 속도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 유체가 포물선의 속도분포로 곡관에 유입하면

단면의 중심부분에서 원심력이 최대가 되고 이것이 유체의 점성마찰이나 압력과 균형을 유지한 축방향 속도분포를 형성하기 때문이다. 주류가 외벽 쪽으로 이동함에 따라 축방향 속도분포는 좌우 양단면에서 최대치를 갖고, 중심부에서 최소로 된다. 즉, 주류 중심부의 유체는 원심력으로 바깥 주위부로 밀리게 되는 결과로 관중앙부에는 주류 자신이 극소치를 갖는 애뉴러형의 속도분포를 갖는 현상이 나타나게 된다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 $Dst = 530$ 인 경우의 축방향속도분포를 나타내고 있다. $Dst = 460$ 인 경우에 비해 속도분포도 비교적 안정화되어 감을 알 수 있다. 이것은 점성력보다 관성력이 우세해져서 점성력의 영향이 점차 적어지기 때문이며, 덕트내에서의 속도분포도 덕트 상하면에서 속도과형이 일정해지고 있다. 곡관덕트의 굽힘각이 $\phi = 120^\circ$, $\phi = 150^\circ$ 및 $\phi = 180^\circ$ 로 증가함에 따라 안정적인 속도과형을 보이고 있으며 곡관의 출구측에서는 이러한 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다.

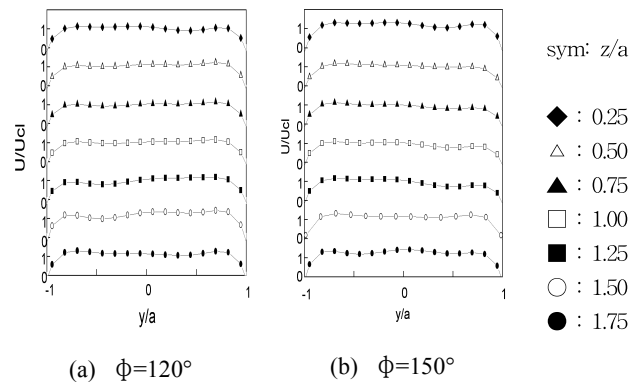


Fig. 3. Axial velocity distributions along axial direction in a curved duct for transitional steady flow at $Dst = 460$.

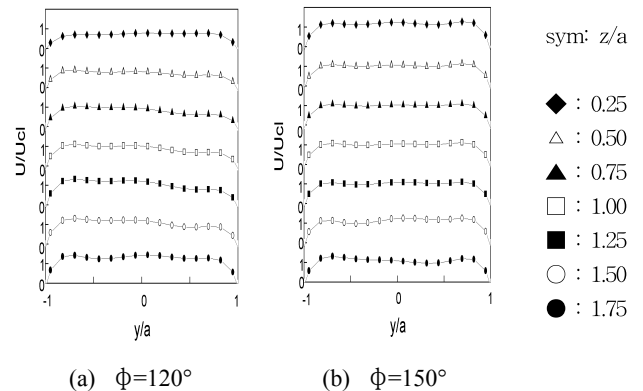


Fig. 4. Axial velocity distributions along axial direction in a curved duct for transitional steady flow at $Dst = 530$.

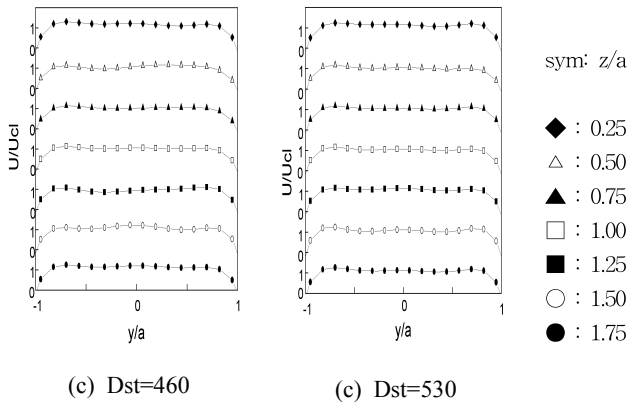


Fig. 5. Axial velocity distributions along axial direction in a curved duct for transitional steady flow at $\phi=180$.

Fig. 4(a)에서 최고속도의 분포는 $Dst=460$ 인 경우와 같이 내측으로 이동하고 있는 현상이 나타나고 있으며, 굽힘각 $\phi=150^\circ$ 지점의 속도분포를 나타내고 있는 Fig. 4(b)에서 다시 외측으로 이동하고 있음을 알 수 있으며 굽힘각 $\phi=180^\circ$ 부근에서는 좌우가 대칭형인 속도분포로 변화하고 있다. $Dst=460$ 인 경우에 비해서 속도가 빠르게 나타나는 것은 원심력에 의한 영향이 크기 때문이다.

Fig. 6에서 Fig. 9는 곡관덕트에서 단수가 $Dst=460$ 일 경우, 굽힘각 $\phi=120^\circ$ 및 $\phi=150^\circ$ 에 대하여 무차원 횡단면 위치인 y 방향에 따른 3차원 수치해석의 결과에 따른 축방향 속도분포를 도시한 것이다. LDV를 이용한 실험결과와 비교하여 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 단수에 따른 영향을 파악하기 위하여 굽힘각 $\phi=120^\circ$ 및 $\phi=150^\circ$ 에 대하여 수평방향속도성분과 정압을 비교하여 나타낸 것이다.

단수가 $Dst=390$ 에서 $Dst=460$ 증가하는 구간에서는 레이놀즈수의 영향을 크게 받으며, 여기에서 $Dst=530$ 로 증가할 경우 원심력에 따른 영향이 큰 폭으로 증가하며 정압도 현저히 낮아지는 현상을 보이고 있다. 이것은 유동장내에서 단수가 증가함에 따라 천이가 일어나기 때문이다. 단수가 $Dst=600$ 에서의 속도분포는 다소의 난류성분이 포함된 것으로 판단되며 이에 대해서는 보다 면밀한 검토가 필요하다.

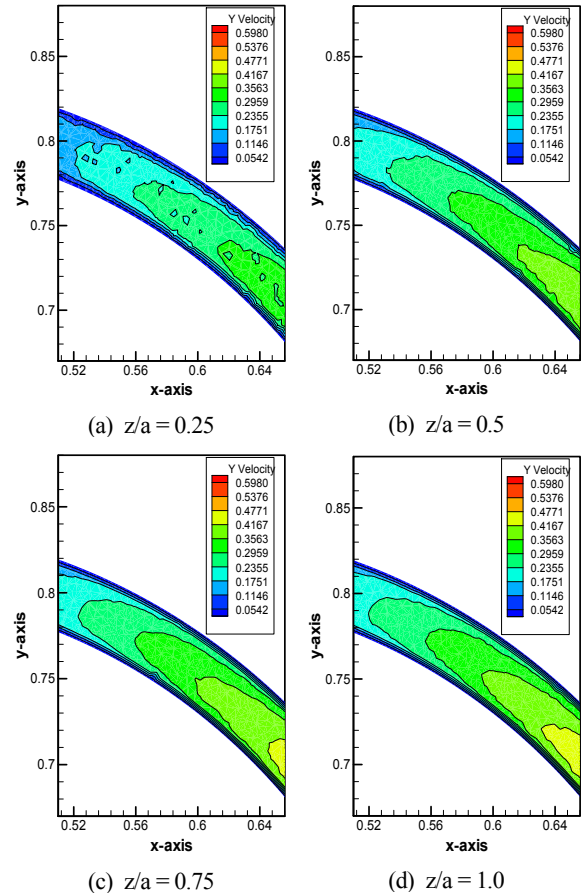


Fig. 6. Equi y -velocity component distributions in a curved duct for transitional steady flow at $\phi=150$, $Dst=460$.

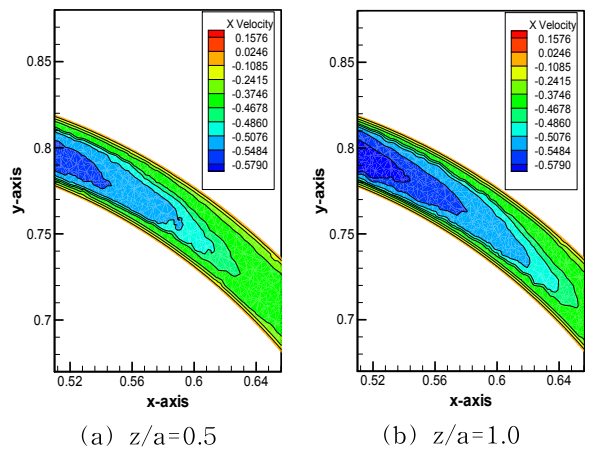


Fig. 7. Equi x -velocity component distributions in a curved duct for transitional steady flow at $\phi=150$, $Dst=460$.

정방형 공기덕트 내부의 유동특성에 원심력이 미치는 영향에 관한 연구

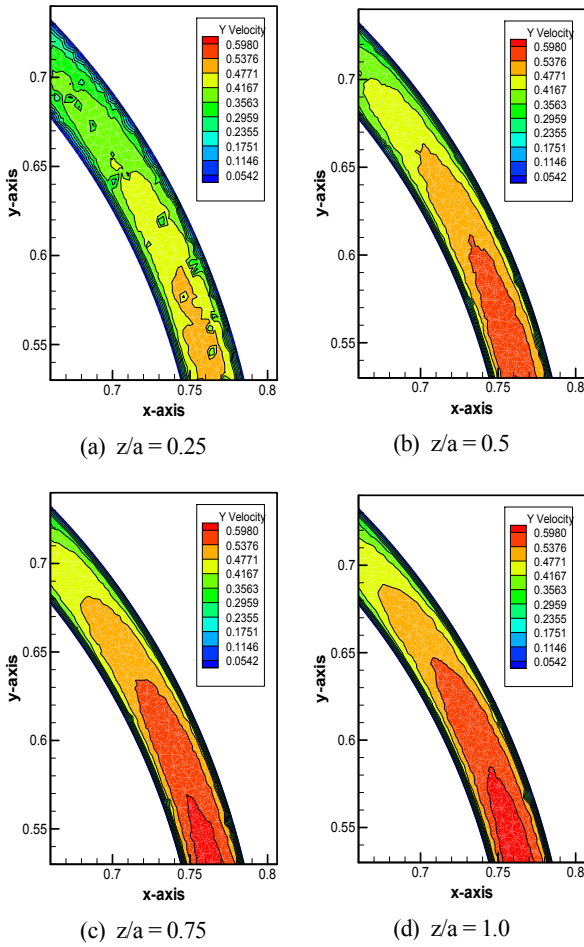


Fig. 8. Equi y-velocity component in a curved duct for transitional steady flow at $\phi = 120$, $Dst = 460$.

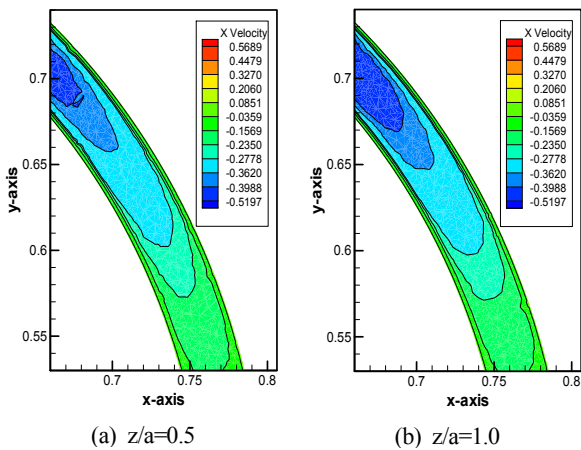


Fig. 9. Equi x-velocity component distributions in a curved duct for transitional steady flow at $\phi = 120$, $Dst = 460$.

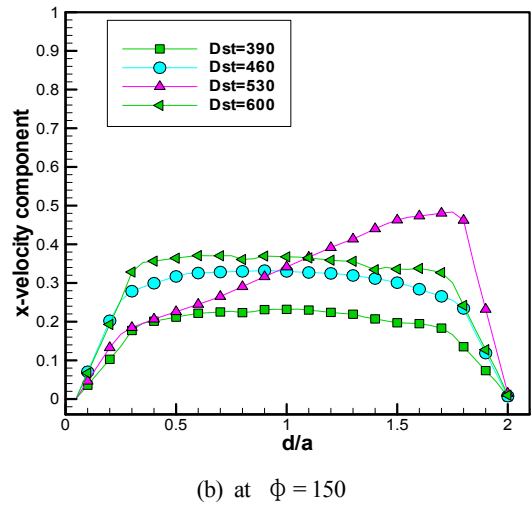
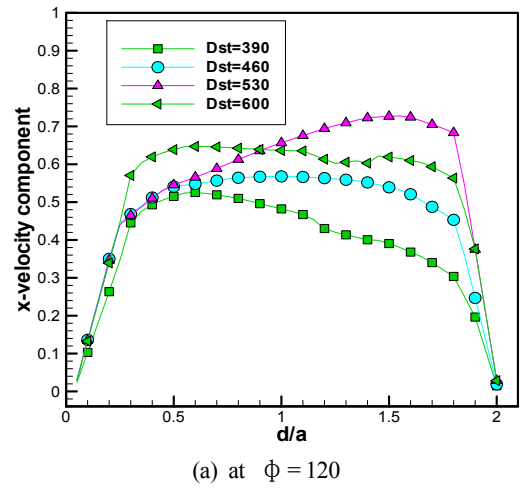


Fig. 10. Comparison of x-velocity component distributions in a curved duct for transitional steady flow.

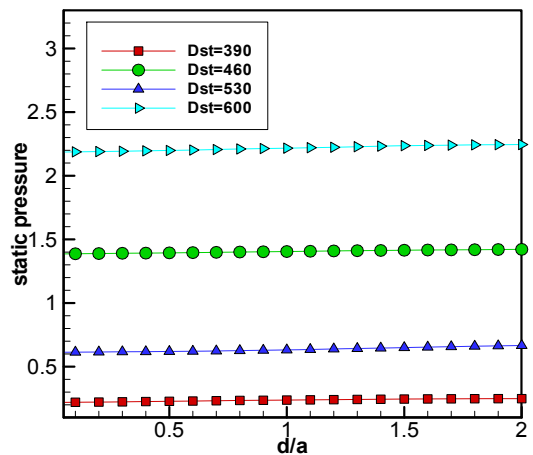


Fig. 11. Comparison of x-velocity component distributions in a curved duct for transitional steady flow.

4. 결론

정사각단면 180° 곡관덕트에서 천이정상유동의 유동특성을 규명하기 위해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 천이정상유동의 축방향 속도분포는 원심력의 영향을 받으며 최대유속의 위치는 굽힘각 $\phi = 120^\circ$ 되는 지점의 경우 $d/a = 0.4$ 였고 $\phi = 150^\circ$ 지점에서는 $d/a = 0.15$ 근방으로 이동하였다.
2. 굽힘각 $\phi = 180^\circ$ 지점에서는 곡관의 영향이 점차 사라져 유동이 안정화 되어 좌우 대칭의 속도분포를 나타낸다.
3. $Dst = 460$ 인 경우에 비해 $Dst = 530$ 인 경우가 점성력이 관성력보다 커지므로 점성력의 영향을 덜 받게되어 속도분포도 일정하고 안정되어가며, 원심력의 영향이 조금 크게 나타났다.

기호설명

a : Duct half-width

b : Duct half-height

Cl : Value of duct center-line

D : Dean number $\left(= Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{\frac{D_h}{2R}} \right)$

D_h : Hydraulic diameter $(= 4ab/(a + b))$

R : Radius Curvature

R_c : Curvature ratio $\left(= \frac{a}{R} = \frac{D_h}{2R} \right)$

Re : Reynolds number $(= D_h \cdot \overline{u}_m/\nu)$

st : Steady flow

u, v, w : Velocity components in and x, y, z-axis

ϕ : Deflection angle of duct

참고 문헌

- [1] 손현철(2005), “곡관덕트에 연결된 정사각단면 직관덕트에서 층류정상유동의 유동장내 유동특성”, 대한기계학회논문집 B, 제29권, 제5호, pp. 545-553.
- [2] 이철재, 조대환(2009), “슬라이드 밸브 급폐쇄에 따른 디스크 주위 비정상유동의 PIV계측에 관한 연구” 해양환경

안전학회지, 제15권, 제3호, pp. 251-256.

- [3] 장용준, 정우성, 박일순(2010), “PIV 기법을 이용한 모형 철도터널 직관덕트에서 유동 분포 계측 및 수치해석 결과와의 비교분석”, 한국전산유체공학회지, 제15권, 제3호, pp. 39-45.
- [4] Aoyama, Y., K. Hijikata and K. Futagami(1989), “Experimental Study on Turbulent Flow in a Curved Tube”, 일본기계학회논문집(B편), pp. 2212-2220.
- [5] Bong, T. G. and G. M. Park(2000), “A Study on the Flow Characteristics of Developing Transitional Steady Flows in a Curved Duct by Using Laser Doppler Velocimeter (I)”, 한국마린엔지니어링학회지, 제24권, 제6호, pp. 768-774.
- [6] Hille, P., R. Vehrenkamp and E. O. Schulz-Dubois(1985), “The Development and Structure of Primary and Secondary Flow in a Curved Square Duct” J. Fluid Mech, Vol. 151, pp. 219-241.
- [7] Lee, Y. H.(2012), “Flow Characteristics of Polluted Air in a Rectangular Tunnel using PIV and CFD”, 한국마린엔지니어링학회지, 제36권, 제5호, pp. 609-617.
- [8] Takami, T., K. Sudou and Y. Tomita(1989), “Flow of Non-Newtonian Fluids in Curved Pipes (5th Report, Turbulent Flow Region)”, 일본기계학회논문집(B편), 제55권, 제516호, pp. 2128-2138.

원고접수일 : 2012년 05월 04일

원고수정일 : 2012년 10월 05일

게재확정일 : 2012년 10월 26일