

임의의 종횡비를 가지는 수직축을 중심으로 회전하는 직관과 정지한 곡관 내부의 층류 유동의 유사성에 관한 수치적 연구

이 공 회* · 백 제 현†
(2001년 11월 5일 접수, 2002년 3월 28일 심사완료)

A Numerical Study on the Similarity of Laminar Flows in Orthogonally Rotating Rectangular Ducts and Stationary Curved Rectangular Ducts of Arbitrary Aspect Ratio

Gonghee Lee and Jehyun Baek

Key Words: Secondary Flow(2차 유동), Coriolis Force(코리올리력), Centrifugal Force(원심력) Duct Flow(덕트 유동), Fully-Developed Laminar Flow(완전 발달 층류 유동) Aspect Ratio(종횡비)

Abstract

The present study showed that a quantitative analogy of the fully developed laminar flows in orthogonally rotating rectangular ducts and stationary curved rectangular ducts of arbitrary aspect ratio could be established. In order to clarify the similarity of the two flows, the dimensionless parameters $K_{LR} = Re/\sqrt{Ro}$ and Rossby number $Ro = w_m/\Omega d$ in a rotating straight duct were used as a set corresponding to Dean number $K_{LC} = Re/\sqrt{\lambda}$ and curvature ratio $\lambda = R/d$ in a stationary curved duct. Under the condition that the value of Rossby number and curvature ratio was large enough, the flow field satisfied the 'asymptotic invariance property': there were strong quantitative similarities between the two flows such as friction factors, flow patterns, and maximum axial velocity magnitudes for the same values of K_{LR} and K_{LC} .

기호설명

A : 종횡비 $= b/a$
 a : 관 넓이
 b : 관 높이
 d : 수력 지름 $= 2ab/(a+b)$
 f : Fanning 관마찰계수

f_0 : 정지 직관에서의 관 마찰계수
 K_{LR} : 회전 직관내의 지배 무차원 변수
 $= Re/\sqrt{Ro}$
 K_{LC} : 정지 곡관내의 지배 무차원 변수
 또는 Dean수 $= Re/\sqrt{\lambda}$
 p : 정압
 p^* : 원심력이 포함된 수정 압력
 $= p - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (x^2 + z^2)$
 R : 유로의 곡률반경
 Re : Reynolds 수 $= w_m d/\nu$
 Ro : Rossby 수 $= w_m/\Omega d$

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : jhbaek@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2168 FAX : (054)279-3199

u, v, w : x, y, z 방향의 속도 성분
 V_s : 2차 유동 속도 $=\sqrt{u^2 + v^2}$
 w_m : 평균 속도

그리스문자

ρ : 유체의 밀도
 ν : 유체의 점도
 λ : 곡률비 $= R/d$
 Ω : 회전각속도

1. 서론

회전 또는 곡률이 존재하는 관 내부의 유동 현상은 터빈 블레이드의 냉각 유로, 원심압축기 회전차, 열교환기 및 냉각 장치등과 같이 다양한 공학 응용분야에 관련되어 있기 때문에 예전부터 관심있게 연구가 수행되어 왔다. 이러한 실질적인 관심을 받아온 이유중의 하나가 바로 회전 및 유선 곡률의 영향으로 인한 2차 유동 현상의 발생이다. 먼저 주유동 방향에 수직인 축을 중심으로 회전하는 직관의 경우에 회전에 의한 코리올리력의 영향으로 관 내부에 2차 유동이 형성된다. 이러한 회전하는 직관 유동에 관한 초기 연구는 주로 회전 각속도가 작은 원관 내부의 완전 발달된 층류 유동을 이론적인 방법으로 해석하는 것에 관심이 집중되었다. Baura⁽¹⁾와 Benton⁽²⁾은 섭동 전개법(perturbation expansion)을 사용해서 관 내부의 2차 유동이 서로 상응하게 회전하는 한쌍의 와류 형태로 나타나는 것을 확인하였다. Speziale⁽³⁾ 및 Khesghi와 Scriven⁽⁴⁾은 회전하는 직관에 대한 수치 계산을 통해서 회전 각속도가 임계값 이상으로 증가하는 경우, 압력면 부근에서 부가적인 비대칭 형태의 와류(Coriolis vortices⁽⁵⁾)가 발생하게 된다는 것을 밝혔다. Yang 등⁽⁶⁾은 회전하는 관 유동에 관한 기존의 연구들을 자세히 정리하였다. 다음으로 정지한 곡관의 경우에 곡관 중심의 속도가 빠른 유동은 벽 근처의 속도가 느린 유동에 비해 원심력의 영향을 더욱 크게 받게 되어서 주유동에 수직하면서 서로 반대방향으로 회전하는 2차 유동(Ekman vortices)이 발생하게 되며, 이로 인해 압력 손실과 열전달률이 상당히 증가하게 된다. 곡관 내부의 층류 유동 해석을 처음으로 이론적인 측면에서 접근한 Dean⁽⁷⁾은 곡

관 내부의 완전 발달된 유동은 주로 Dean수의 영향을 받는다는 것을 알아냈다. 이후로 많은 이론, 실험 및 계산적 접근이 이루어졌는데, Humphrey 등⁽⁸⁾은 LDA를 사용해서 90° 곡관 내부의 2차 유동 형태와 재순환(recirculation)의 발생위치를 제시하였다. Winters⁽⁹⁾는 선형 안전성 해석(linear stability analysis)을 통해서 2차 유동의 분기(bifurcation) 현상을 살펴보았다. Berger 등⁽¹⁰⁾은 곡관 유동에 대한 기존의 연구들을 체계적으로 종합, 정리하였다.

한편 실험 측정상의 어려움으로 상대적으로 이해가 부족했던 회전하는 직관 내부의 유동 발달 특성을 정지한 곡관 유동으로부터 유추하기 위해서 앞서 언급된 수직으로 회전하는 직관과 정지한 곡관에서 볼 수 있는 유동 형태의 유사성에 관한 연구가 단순한 정성적인 접근 방법으로 주로 원형 단면인 경우에 대해서 예전부터 행하여져 왔다. 반면에 저자^(11,12)는 원형 단면 관 유동에 대해서 Trefethen⁽¹³⁾ 및 Ishigaki⁽¹⁴⁾에 의해서 제안된 무차원 변수들을 이용해서 정사각 단면 관 내부의 완전 발달된 층류 유동에서 이러한 두 유동 사이에 강한 정량적인 유사성이 존재한다는 사실을 고차의 정확도를 가진 수치 기법을 통해서 이미 밝힌 바 있다. 본 연구에서는 유동 불안정성 및 압력 손실에 상당한 영향을 미치는 종횡비 변화를 고려한 사각 단면 관 내부에서도 이러한 두 유동 사이에 강한 정량적인 유사성이 존재하는 것을 밝히고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치해법

2.1 지배방정식

Fig. 1과 2는 주유동에 수직한 y 축을 중심으로 일정한 각속도 Ω 로 회전하는 사각 단면 직관과 곡률 반경이 R 로 표시된 곡관 내부의 완전 발달된 층류 유동을 해석하기 위해 사용된 계산 모델의 개략도 및 좌표계를 나타낸다. 각각의 유동에 대한 무차원화된 지배 방정식의 유도는 참고 문헌^(11,12)에 자세히 설명되어 있으므로 이를 참조하기 바라며, 여기서는 결과식만을 제시하기로 한다.

2.1.1 회전 직관

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} \\ = -\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial \tilde{x}} + \frac{1}{K_{LR}} \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} \right) + 2\tilde{w} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} \\ = -\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial \tilde{y}} + \frac{1}{K_{LR}} \left(\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{y}^2} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{y}} \\ = \tilde{C}_1 + \frac{1}{K_{LR}} \left(\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{y}^2} \right) - \frac{2}{Ro} \tilde{u} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 p^* 은 수정된 압력을 나타내며,

$$p^* = p - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (x^2 + z^2) \tag{5}$$

로 주어진다. 완전 발달된 유동 영역에서 주유동 방향으로의 압력 구배는 일정하므로

$$-\frac{\partial p^*}{\partial z} = C_1 \tag{6}$$

로 표시될 수 있으며, 여기서 C_1 은 상수이다. 또한 $Ro = w_m / \Omega d$ 는 코리올리력에 대한 관성력의 비를, $K_{LR} = Re / \sqrt{Ro}$ 은 회전하는 직관 내부의

2차 유동의 대표 속도 크기 $U_{SR} = w_m / \sqrt{Ro}$ 에 기초한 Re 를 나타낸다. 이와 같이 주유동 방향에 수직인 축을 중심으로 회전하는 직관 내부의 층류 유동의 특성은 무차원 변수 Ro 와 K_{LR} 에 의해서 나타낼 수 있다. 만일 Ro 가 충분히 큰 값을 가지게 되면, 식 (4)에서 Ro 를 포함한 항은 사라지게 되고, 회전하는 직관 내부의 유동은 오직 K_{LR} 에 의해서만 영향을 받게 되는 ‘점근적인 불변 특성’ (Asymptotic invariance property)을 가지게 된다.

2.1.2 정지 곡관

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\tilde{u}}{\lambda + \tilde{x}} = 0 \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} - \frac{\lambda}{\lambda + \tilde{x}} \tilde{w}^2 = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} \\ + \frac{1}{K_{LC}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{1}{\lambda + \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} - \frac{\tilde{u}}{(\lambda + \tilde{x})^2} \right] \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} \\ + \frac{1}{K_{LC}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{1}{\lambda + \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} \right] \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{t}} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\tilde{u}\tilde{w}}{\lambda + \tilde{x}} = \tilde{C}_2 \\ + \frac{1}{K_{LC}} \left[\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{1}{\lambda + \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{x}} - \frac{\tilde{w}}{(\lambda + \tilde{x})^2} \right] \end{aligned} \tag{10}$$

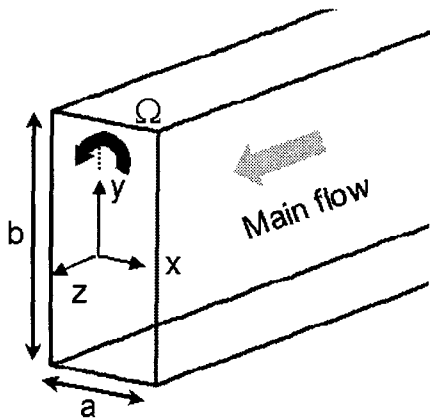


Fig. 1 Coordinate system for flow analysis in a rotating straight duct

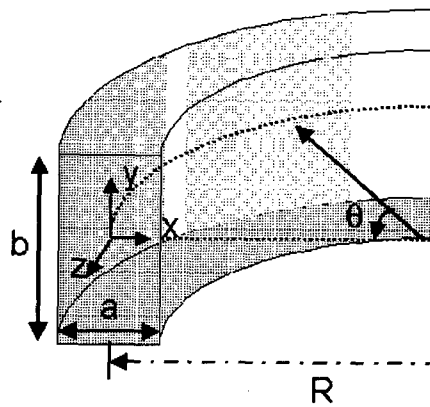


Fig. 2 Coordinate system for flow analysis in a stationary curved duct

회전하는 직관의 경우와 동일하게 완전 발달된 영역에서 주유동 방향으로의 압력 구배는 일정하므로

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{1}{R} \frac{\partial p}{\partial \theta} = C_2 \quad (11)$$

이며, 여기서 C_2 는 상수이다. 또한 $K_{LC} = Re/\sqrt{\lambda}$ 는 곡관 유동에서 주요한 변수중의 하나인 Dean수를, 곡률비 $\lambda = R/d$ 는 원심력에 대한 관성력의 비를 나타낸다. 이처럼 K_{LC} 와 λ 는 정지한 곡관 내부의 층류 유동을 특징지워 주는 중요한 변수임을 알 수 있다. Ito⁽¹⁵⁾ 및 Austin과 Seader⁽¹⁶⁾의 연구 결과에 의하면 $\lambda > 8$ 인 경우에는 λ 의 영향은 실제로 무시할 수 있을 정도로 작은 것으로 알려져 있다. 결과적으로 식 (7)~(10)에서 곡률비 λ 는 유동 특성에 영향을 미치지 않게 되고, K_{LC} 만이 정지한 곡관 내부의 유동 특성을 결정하는 지배적인 변수가 된다.

2.2 수치해법

Fractional-step 방법을 사용해서 회전하는 직관 및 정지한 곡관 내부의 완전 발달된 층류 유동을 해석하였다. 먼저 운동 방정식에서 ADI 방법을 이용하여 가상 시간(pseudo-time)을 진행하면서 속도장을 구하고, 다음 시간 단계에서 연속방정식이 만족되도록 압력에 대한 Poisson 방정식을 계산하였다. 점성항과 압력항은 2차 중앙차분법을, 대류항은 2차 상류 차분법을 이용해서 운동 방정식에서 인위적인 소산(artificial dissipation)의 필요를 제거하였다. 수렴 가속화 기법의 하나인 국부 시간단계(local time step) 방법을 사용해서 수렴성을 향상시켰다. 비엇갈림 격자 배열의 사용으로 경계조건의 부가를 용이하게 하였고, 각각의 변수값들을 저장하는데서 오는 부가적인 기억장소의 필요를 감소시켰다. 격자수는 중횡비가 1, 2 및 4인 경우에 반경 방향과 높이 방향으로 각각 35×18 , 35×35 및 35×69 개를 사용하였다. 벽 근처에서는 경계층의 영향으로 주유동과 2차 유동의 급격한 구배가 존재하므로 격자를 조밀하게 배열하였다. 대칭적인 유동 형태를 고려하여 대칭면에서 대칭조건을 부여하면서 관 단면의 절반 부분에 대해서만 계산을 수행하였으며, 벽에서는

점착(no-slip)조건을 적용해서 모든 속도 성분들을 영으로 두었다.

$$u = v = w = 0 \quad \text{at} \quad x = \pm a/2, \quad y = \pm b/2 \quad (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = v = 0 \quad \text{at} \quad y = 0 \quad (13)$$

3. 결 과

3.1 일반적인 유동 형태

Fig. 3에서 K_{LR} 과 K_{LC} 의 크기가 동일한 경우에 대해서 2차 유동 속도 벡터와 유선을 표시하였다. 상부는 정지한 곡관을, 하부는 회전하는 직관을 나타낸다. 따라서 정지한 곡관의 바깥쪽벽

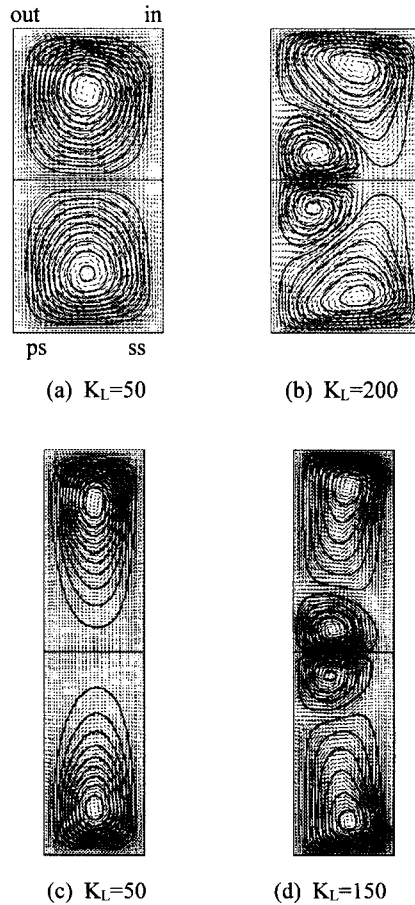


Fig. 3 Secondary velocity vector and streamlines for $Ro=10$ and $\lambda=10$ ((a), (b); $A=2$, (c), (d); $A=4$)

은 회전 직관의 압력면(pressure side)에, 안쪽벽은 흡입면(suction side)에 해당한다. 종횡비 $A=1$ 인 경우는 참고문헌^(11,12)에 자세히 결과가 설명되어 있으므로 여기서는 생략하고, $A=2$ 및 4 인 경우에 대해서 살펴보고자 한다. 회전하는 직관의 경우, 코리올리력의 영향으로 서로 상반된 방향으로 회전하는 2개의 와류(Ekman vortices)가 발생하는 것을 볼 수 있다(Fig. 3(a),(c)). 이러한 2차 유동 형상은 K_{LR} 이 임계값 이상으로 커지면서 다른 형태를 보이게 된다. 즉, 압력 구배와 코리올리력이 서로 이루고 있던 균형이 깨어지면서 압력면에서 경계층이 불안정하게 되며, 이로 인해 부가적인 2차 유동(Coriolis vortices⁽⁵⁾)이 발생하여 결과적으로 4개의 와류 구조를 형성하는 것을 볼 수 있다

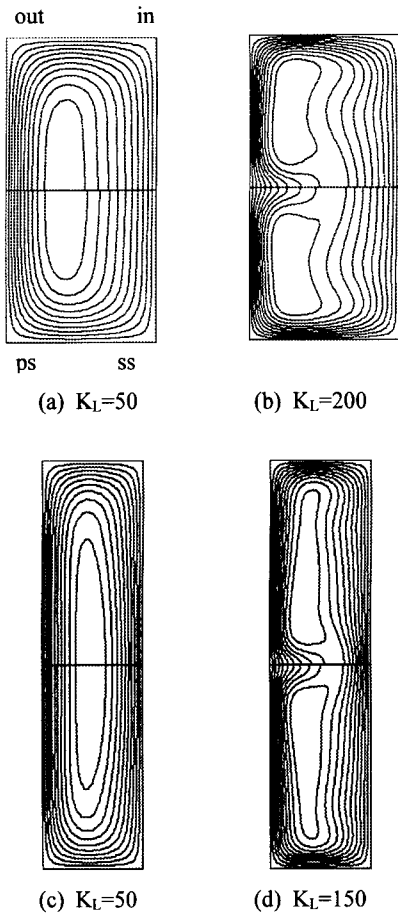


Fig. 4 Non-dimensionalized axial velocity contours for $Ro=10$ and $\lambda=10$ ((a), (b); $A=2$, (c), (d); $A=4$)

(Fig. 3(b),(d)). 반면에 정지한 곡관에서는 곡관 중심의 운동량이 크고, 비점성 특성을 가지는 유동이 벽 근처의 속도가 느린 유동에 비해서 원심력의 영향을 더욱 크게 받게 되어 바깥쪽벽으로 이동하면서 주유동 방향에 수직인 2차 유동이 발생한다(Fig. 3(a),(c)). 한편 K_{LC} 가 임계값보다 큰 경우에 회전하는 직관 내부의 유동 불안정성과 유사한 형태의 2차 유동(Dean vortices⁽⁷⁾)이 반경 방향 압력 구배와 원심력 사이의 불균형으로 인해 곡관의 바깥쪽벽에서 형성되는 것을 볼 수 있다(Fig. 3(b),(d)).

Fig. 4는 무차원화된 축방향 속도 (w/w_m)를 보여준다. K_L 의 크기가 증가하면서 관 중심에 위치했던 운동량이 큰 유체가 압력면(바깥쪽벽)으로 이동하게 되어 압력면(바깥쪽벽) 및 상,하부벽

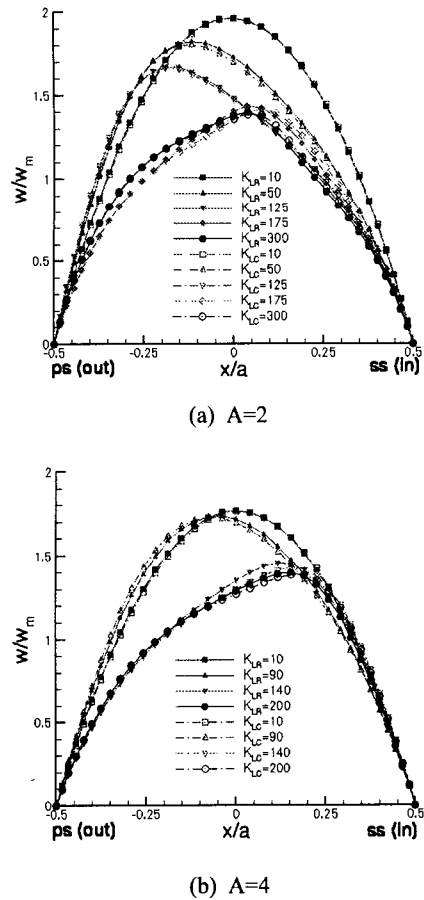
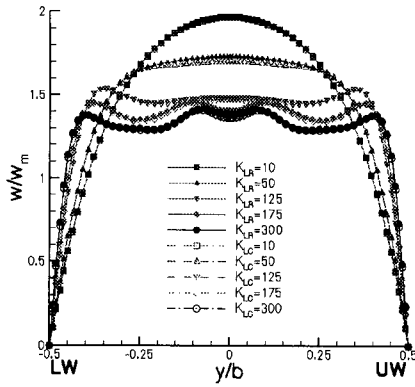
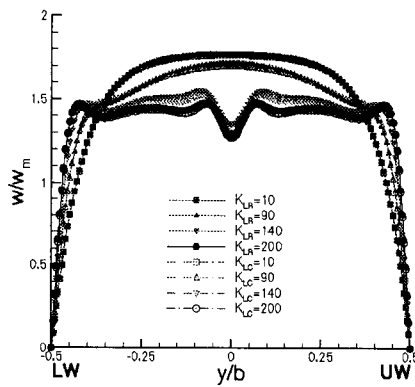


Fig. 5 Axial velocity profiles along the horizontal centerline of the duct for $Ro=10$ and $\lambda=10$



(a) A=2



(b) A=4

Fig. 6 Axial velocity profiles along the vertical centerline of the duct for $Ro=10$ and $\lambda=10$

에서의 경계층 두께가 얇아지는 반면, 흡입면(안쪽벽)에서는 운동량이 작은 유체가 축척되면서 경계층이 두꺼워진다. 조사된 K_L 값들에 대해서 두 유동의 축방향 속도 분포가 전체적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에서는 대칭면에서 축방향 속도의 수평방향 분포를 표시하였다. 먼저 종횡비가 $A=2$ 인 경우를 살펴보면 $K_L=10$ 에서 2차 유동은 축방향 속도 형상에 거의 영향을 미치지 않으며, 결과적으로 축방향 속도는 관 중심에서 최대값을 가지는 대칭적인 형태를 유지한다. $K_L=50$ 과 125로 증가하면서 최대 속도 위치가 압력면으로 치우치게 되고 축방향 속도는 점차적으로 비대칭 형태를 나타낸다. $K_L=175$ 와 300에서는 대칭면에 위

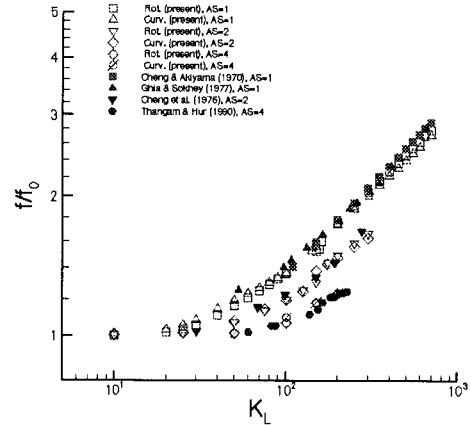


Fig. 7 Friction factor ratio

치한 압력면 및 바깥쪽벽 부근에서 발생하는 부가적인 와류의 영향으로 축방향 속도의 최대 크기가 감소하게 되고, 최대 속도 지점이 다시 관 중심으로 이동하게 된다(Fig. 5(a)). 종횡비 $A=4$ 인 경우에는 $A=2$ 와 비교시 부가적인 와류가 처음으로 발생하는 임계값 K_L 이 작고 최대 속도 위치가 흡입면쪽으로 더욱 치우쳐 있다(Fig. 5(b)).

Fig. 6은 관 중심에서 수직방향으로 축방향 속도 형상을 나타낸다. 그림 하단의 LW는 하부벽을, UW는 상부벽을 표시한다. 상, 하부벽 근처에서 2개의 속도 최고값의 존재는 이 부근에서 유선 방향의 와류가 발생한다는 사실을 뒷받침해 준다. 압력면 및 바깥쪽벽에서 부가적인 와류의 발생으로 인해 손실된 유선 방향 운동량의 일부가 관 중심 근처에서 흡수되기 때문에 곡관 중심 부근에서 또 다른 대칭적 형태의 최대 속도값이 발생한다.

3.2 마찰계수

관 유동 해석에서 마찰 계수를 정확하게 구하는 것은 압력 손실을 계산하기 위해 꼭 필요한 작업이다. Fig. 7은 마찰계수의 비를 나타내며, 여기서 f_0 는 정지한 직관 내부의 완전 발달된 유동에 대한 평균 마찰 계수이다. 종횡비가 클수록 마찰계수는 완만한 증가 형태를 보이며, 동일한 K_L 값에 대해서 상대적으로 작은 값을 가진다. 계산된 두 유동의 마찰 계수는 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 기존의 계산 결과⁽¹⁷⁻²⁰⁾를 정확하게 예측하고 있다.

3.3 다른 유동 특징들

Fig. 8은 K_L 의 크기 변화에 따른 최대 축방향 속도의 비 (w_{max}/w_m)를 나타내고 있다. 유체의 불안정성이 발생하는 임계값 근처에서 불연속성이 존재하는 것을 제외하고는 두 유동의 최대 축방향 속도의 비가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 K_L 의 크기 변화에 따른 무차원화된 2차 유동 강도의 변화를 나타낸다. Fig. 7의 마찰계수와 같은 적분 물성치(integral property)는 정량적으로 잘 일치하는 반면, 2차 유동강도는 K_L 의 크기가 작은 영역에서 약간의 차이를 보여주고 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 회전하는

직관 유동의 경우 코리올리력은 Ωw 에 비례하나, 곡관 유동에서 원심력은 w^2/R 에 비례하기 때문이다. 이러한 두 종류의 힘들이 단면의 모든 곳에서 동일할 수는 없고, 결국 2차 유동 강도와 같은 국부적인 값들은 약간의 차이를 보이게 된다. 한편 중형비가 커질수록 두 유동의 2차 유동 강도의 차이는 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 중형비 증가시 2차 유동 강도의 크기가 감소하는 것은 볼 수 있는데, 이것은 평균 마찰 계수 감소의 원인이 된다 (Fig. 7).

4. 결 론

임의의 중형비를 가지면서 주유동에 수직인 축을 중심으로 회전하는 사각 단면의 직관과 정지한 곡관에서의 완전 발달된 층류 유동의 유사성을 정량적으로 밝히기 위해 물리적으로 타당한 상사변수와 고차의 정확도를 가지는 수치 해법을 이용하여 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원형 단면 관 유동에 대해 Ishigaki⁽¹⁴⁾에 의해서 제안된 무차원 변수의 타당성이 임의의 중형비를 가지는 사각 단면 관 유동에 대해서 성립하는 것을 확인하였다. 즉, 회전하는 직관 유동의 해석에 사용된 무차원 변수 K_{LR} 과 Rossby수 Ro 는 정지한 곡관 유동에서 Dean수 K_{LC} 와 곡률비 λ 에 각각 대응한다는 사실이 확인되었다.

(2) Ro 와 λ 가 충분히 큰 값을 가지는 경우 ($Ro, \lambda > 8$), K_{LR} 과 K_{LC} 는 각각 회전하는 직관과 정지한 곡관 유동에서 유일한 지배변수가 되며, 유동 특성들은 이들 무차원 변수들에 대해 '점근적인 불변 특성'을 나타내게 된다. 결과적으로 동일한 K_L 값에 대해서 두 유동의 정량적인 유사성이 존재하게 되며, 이와 같은 사실은 중형비가 변화는 경우에도 명백히 성립하는 것을 확인하였다.

(3) 평균 마찰계수 및 주유동의 형태는 일치하였으며, 단면에서의 최대 축방향 속도 및 2차 유동 강도 또한 폭넓은 K_L 값의 범위 안에서 서로 유사한 형태를 나타내었다.

후 기

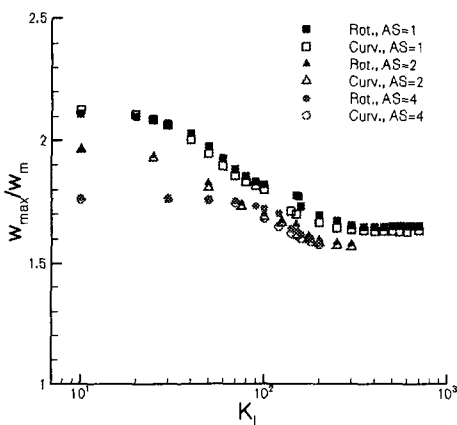


Fig. 8 Variation of the maximum axial velocity ratio with K_L ($Ro = \lambda = 10$)

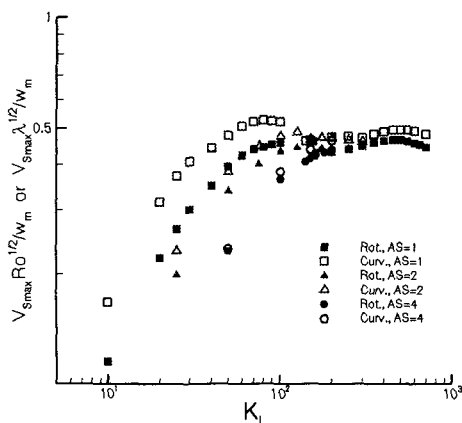


Fig. 9 Variation of the secondary velocity intensity with K_L ($Ro = \lambda = 10$)

본 연구는 BK21 지원 사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Baura, S. N., 1954, "Secondary Flow in a Rotating Straight Pipe," *Proc. R. Soc. Lond., A* 227, pp. 133~139.
- (2) Benton, G. S., 1956, "The Effect of the Earth's Rotation on Laminar Flow in Pipes," *J. Appl. Mech.*, Vol. 23, pp. 123~127.
- (3) Speziale, C. G., 1983, "Numerical Study of Viscous Flow in Rotating Rectangular Ducts," *J. Fluid Mech.*, Vol. 122, pp. 251~271.
- (4) Khesghi, H. S. and Scriven, L. E., 1985, "Viscous Flow through a Rotating Square Channel," *Phys. Fluids*, Vol. 28, pp. 2868~2979.
- (5) Hart, J. E., 1971, "Instability and Secondary Motion in a Rotating Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, pp. 341~353.
- (6) Yang, W. J., Fann, S. and Kim, J. H., 1994, "Heat and Fluid Flow inside Rotating Channels," *Appl. Mech. Review*, Vol. 47, pp. 367~396.
- (7) Dean, W. R., 1927, "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Phil. Mag.*, Vol. 4, pp. 208~223.
- (8) Humphrey, J. A. C., Taylor, A. M. K. and Whitelaw, J. H., 1977, "Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature," *J. Fluid Mech.*, Vol. 83, pp. 509~527.
- (9) Winters, K. H., 1987, "A Bifurcation Study of Laminar Flow in a Curved Tube of Rectangular Cross-section," *J. Fluid Mech.*, Vol. 180, pp. 343~369.
- (10) Berger, S. A., Tabolt, L. and Yao, L.-S., 1983, "Flow in Curved Pipes," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 15, pp. 461~512.
- (11) 이공희, 백제현, 2000, "수직축을 중심으로 회전하는 직관과 정지한 곡관내에서의 층류 유동의 유사성 비교," 대한기계학회논문집(B), 제 24권 제12호, pp. 1683~1691.
- (12) Lee, G. H. and Baek, J. H., 2001, "Similarity Comparison of Laminar Flows between in Orthogonally Rotating Square Duct and Stationary Curved Square Duct," *Int. J. Rotating Machinery* (in press).
- (13) Trefethen, L. M., 1957, "Flow in Rotating Radial Ducts," *General Electric Report*, No. 55GL350-A.
- (14) Ishigaki, H., 1994, "Analogy between Laminar Flows in Curved Pipes and Orthogonally Rotating Pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 268, pp. 133~145.
- (15) Ito H., 1959, "Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes," *J. Basic Eng.*, Vol. 81, pp. 123~134.
- (16) Austin, L. R. and Seader, J. D., 1973, "Fully Developed Viscous Flow in Coiled Circular Pipes," *AIChE J.*, Vol. 19, pp. 85~93.
- (17) Cheng, K. C. and Akiyama, M., 1970, "Laminar Forced Convection Heat Transfer in Curved Rectangular Channels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 471~490.
- (18) Cheng, K. C. Lin, R. C. and Ou, J. W., 1976, "Fully Developed Laminar Flow in Curved Rectangular Channels," *J. Fluids Eng.*, Vol. 98, pp. 41~48.
- (19) Ghia, K. N. and Sokhey, J. S., 1977, "Laminar Incompressible Viscous Flow in Curved Ducts of Regular Cross-Sections," *J. Fluids Eng.*, Vol. 99, pp. 640~648.
- (20) Thangam, S. and Hur, N., 1990, "Laminar Secondary Flows in Curved Rectangular Ducts," *J. Fluid Mech.*, Vol. 217, pp. 421~440.