

## 회전하는 정사각 단면 U자형 곡관 내부의 유동 발달에 관한 수치적 연구 (II)

- 난류 유동 -

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

### A Numerical Study on the Flow Development around a Rotating Square-Sectioned U-Bend (II)

- Turbulent Flow -

Gonghee Lee and Jehyun Baek

**Key Words:** Secondary Flow(2차 유동), Coriolis Force(코리올리력), Centrifugal Force(원심력), Duct Flow(덕트 유동), Turbulent Flow(난류 유동), Developing Flow(발달 유동)

#### Abstract

The present study investigates in detail the combined effects of the Coriolis force and centrifugal force on the development of turbulent flows in a square-sectioned U-bend rotating about an axis parallel to the center of bend curvature. When a viscous fluid flows through a curved region of U-bend, two types of secondary flow occur. One is caused by the Coriolis force due to the rotation of U-bend and the other by the centrifugal force due to the curvature of U-bend. For positive rotation, where the rotation is in the same direction as that of the main flow, both the Coriolis force and the centrifugal force act radially outwards. Therefore, the flow structure is qualitatively similar to that observed in a stationary curved duct. On the other hand, under negative rotation, where these two forces act in opposite direction, more complex flow fields can be observed depending on the relative magnitudes of the forces. Under the condition that the value of Rossby number and curvature ratio is large, the flow field in a rotating U-bend can be represented by two dimensionless parameters :  $K_{TC} = Re^{1/4}/\sqrt{\lambda}$  and a body force ratio  $F = \lambda/Ro$ . Here,  $K_{TC}$  has the same dynamical meaning as  $K_{LC} = Re/\sqrt{\lambda}$  for laminar flow.

#### 기호설명

$d$  : 수력 지름  
 $F$  : 체적력 비 =  $\lambda/Ro$   
 $f$  : Fanning 관마찰계수  
 $f_0$  : 정지한 정사각 직관에서 관마찰계수

$K_{LR}$  : 회전 직관 내의 층류 유동에서 지배 무차원 변수 =  $Re/\sqrt{Ro}$   
 $K_{LC}$  : 정지 곡관 내의 층류 유동에서 지배 무차원 변수 또는 Dean수 =  $Re/\sqrt{\lambda}$   
 $K_{TR}$  : 회전 직관 내의 난류 유동에서 지배 무차원 변수 =  $Re^{1/4}/\sqrt{Ro}$   
 $K_{TC}$  : 정지 곡관 내의 난류 유동에서 지배 무차원 변수 =  $Re^{1/4}/\sqrt{\lambda}$   
 $k$  : 난류 운동 에너지  
 $P$  : 정압  
 $R$  : 유로의 곡률반경

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

- $Re$  : Reynolds 수 =  $W_m d / \nu$   
 $Ro$  : Rossby 수 =  $W_m / \Omega d$   
 $U, V, W$  :  $x, y, z$  각 방향의 속도 성분  
 $W_m$  : 평균 속도  
 $y^+$  : 벽으로부터 무차원화된 거리

## 그리스문자

- $\Delta y_1$  : 인접한 벽에서부터 첫 번째 격자 사이의 거리  
 $\Omega$  : 회전각속도  
 $\lambda$  : 곡률비 =  $R/d$   
 $\mu$  : 유체의 점도  
 $\nu$  : 유체의 동점도 계수  
 $\rho$  : 유체의 밀도  
 $\omega$  : 비 소산율

## 상첨자

- : 평균값

## 1. 서론

가스 터빈의 고성능, 고효율 및 경량화에 대한 요구가 지속적으로 증가하면서 고온에서 작동하는 가스 터빈 내부의 냉각 시스템에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 가스 터빈 내부의 냉각은 압축기를 통과한 상대적으로 차가운 공기가 터빈 블레이드 내부의 냉각 유로를 따라 순환하면서 블레이드의 작동 온도를 안정한 수준으로 유지시키면서 이루어진다. 최소량의 냉각수로 필요한 냉각율을 얻을 수 있는 효과적인 냉각 시스템을 개발하기 위해서 설계자는 냉각 유로 내부의 유동 및 열거동 특성을 명확하게 이해할 필요가 있다. 터빈 블레이드의 냉각수 유로로 사용되는 U자형 곡관은 일정한 각속도로 원주 방향으로 회전하는 직관과 이에 연결된 곡관의 조합으로 단순화할 수 있는데, 먼저 직관부의 경우에는 회전에 의한 코리올리력의 영향으로 관 내부에서는 정지한 곡관 유동에서 볼 수 있는 것과 유사한 형태의 2차 유동이 형성된다. 다음으로 곡관부에서는 곡률에 의한 원심력과 곡관 회전시 발생하는 코리올리력의 영향으로 주유동 방향에 수직한 2차 유동이 발생하게 되어 U자형 곡관 내부의

유동은 상당히 복잡한 형태를 나타내게 된다.

이러한 U자형 곡관 내부의 유동 발달 및 열전달 특성을 파악하기 위해서 지속적인 연구가 수행되어 왔는데, 이들 중에 수치적 방법으로 접근한 기존 연구들<sup>(1-4)</sup> 대부분은 유동 박리, 2차 유동, 회전 및 곡률의 존재로 상당히 복잡해진 곡관 내부 유동의 물리적인 특성을 파악하기 보다는 정확한 유동을 예측하기 위한 난류 모델 개발에 치중하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 회전하는 정사각 단면 U자형 곡관 내부의 층류 유동의 발달 특성에 관한 선행 연구<sup>(5)</sup>를 통해서 타당성이 입증된 무차원 변수와 동일한 물리적 의미를 가지는 무차원 변수를 이용하여 회전 방향 및 회전 각속도의 크기가 U자형 곡관 내부의 난류 유동의 발달 특성에 미치는 영향을 명확히 규명하고자 한다.

## 2. 지배방정식 및 수치해법

## 2.1 지배방정식

곡관부의 곡률 중심에 평행한 Y축을 중심으로 일정한 각속도로 회전하는 정사각 단면 U자형 곡관 내부의 유동을 해석하기 위해 사용된 계산 모델의 개략도 및 좌표계를 Fig. 1에 표시하였다. 계산 모델은 2개의 직관부(유입 직관부의 길이  $L_1=10d$ , 유출 직관부의 길이  $L_2=30d$ )와 곡률 반경  $\lambda=10$ 인  $180^\circ$  곡관부로 구성되어 있으며, 비압축성, 난류 유동인 경우에 연속방정식 및 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = \\ \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \\ - 2\rho \varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k - \rho(\Omega_j X_k \Omega_i - \Omega_j X_i \Omega_k) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $X_i$ 는 회전축으로부터의 거리,  $U_i$ 는 평균 속도 벡터,  $\Omega_j$ 는 각속도 벡터,  $\overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력 텐서이다.

난류 유동을 해석하기 위해서 Wilcox<sup>(6)</sup>에 의해 제안된 저레이놀즈수  $k-\omega$  모델을 사용하였다.

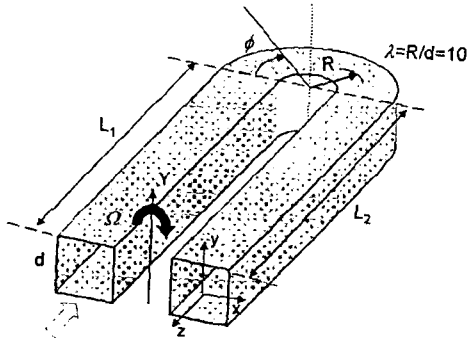


Fig. 1 Coordinate system for flow analysis in a rotating square-sectioned U-bend

이 모델은 역압력 구배, 박리, 회전 및 곡률이 존재하는 유동 계산에서 만족할 만한 결과를 제시하였다.<sup>(7-10)</sup>

## 2.2 상사변수

회전하는 U자형 곡관 내부의 층류 유동의 발달 특성에 관한 선행 연구<sup>(5)</sup>에서 변수들의 적절한 조합을 Navier-Stokes 방정식에 적용한 결과  $Ro$ 와  $\lambda$ 가 충분히 큰 값을 가지는 경우 ( $Ro, \lambda > 8$ ), 유동 특성은 Dean수  $K_{LC} = Re/\sqrt{\lambda}$  및 체적력비  $F = \lambda/Ro$ 로 표현할 수 있었다. 난류 유동의 경우에는 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식에서 크기를 알 수 없는 난류 응력항들이 포함되어 있기 때문에 선행 연구<sup>(5)</sup>에서 사용했던 방법으로는 무차원 특성 변수를 유도할 수 없다. 따라서 층류 유동 해석시 사용했던 특성 변수와 동일한 물리적 의미를 가지는 난류 유동에서의 특성 변수를 아래에 설명된 힘 성분들을 이용하여 유도하고자 한다.<sup>(11)</sup>

$$Ro = F_i/F_r = W_m/\Omega d \quad (3)$$

$$\lambda = F_i/F_c = R/d \quad (4)$$

$$K_{LC} = (F_i F_c)^{1/2}/F_{Lv} = Re/\sqrt{\lambda} \quad (5)$$

여기서,  $F_i \sim \rho W_m^2/d$ ,  $F_r \sim \rho \Omega W_m$ ,  $F_c \sim \rho W_m^2/R$  및  $F_{Lv} \sim \mu W_m/d^2$ 는 각각 관성력, 코리올리력, 원심력 및 층류 유동에서의 점성력을 나타낸다. 난류 유동의 경우에  $F_i$ ,  $F_r$  및  $F_c$ 는 층류 유

동과 동일한 형태를 가지기 때문에 특성 지배 무차원 변수  $Ro$ 와  $\lambda$ 는 그대로 사용될 수 있다. 반면에 난류 유동에서 점성력은 Blasius의 공식<sup>(12)</sup>을 적용하면  $F_{Tv} \sim \tau_w/d \sim \rho W_m^{7/4} \nu^{1/4} d^{-5/4}$ 의 형태로 표시되므로 층류 유동 해석시 사용된 무차원 변수  $K_{LC}$ 와 동일한 물리적 의미를 가지는 특성 지배 무차원 변수  $K_{TC}$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$K_{TC} = (F_i F_c)^{1/2}/F_{Tv} = Re^{1/4}/\sqrt{\lambda} \quad (6)$$

요약하면,  $Ro$ 와  $\lambda$ 가 충분히 큰 값을 가지는 경우에 회전하는 U자형 곡관 내부의 난류 유동의 발달 특성은  $K_{TC}$ 와  $F$ 로 표현이 가능하다.

## 2.3 수치해법

Fractional-step 방법을 사용해서 회전하는 U자형 곡관 내부의 난류 유동을 해석하였다. 먼저 운동방정식에서 ADI 방법을 이용하여 가상 시간(pseudo-time)을 진행하면서 속도장을 구하고, 다음 시간 단계에서 연속방정식이 만족되도록 압력에 대한 Poisson 방정식을 계산하였다. 대류항 차분시 계산의 안정성을 위해 사용되었던 1차의 정확도를 가지는 풍상차분법은 격자 간격에 비례해서 계산 오차가 발생하기 때문에 조밀한 격자의 사용이 불가피하며, 이로 인해 과도한 기억 장소를 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 2차 상류차분법을 이용하여 대류항을 차분화함으로써 계산 시간 절감 및 해의 정확성 향상을 도모하는 동시에 운동 방정식에서 인위적인 소산(artificial dissipation)의 필요성을 제거하였다. 한편 점성항과 압력항은 2차 중앙차분법을 이용해서 차분화하였다. 난류 운동에너지  $k$  및 비소산율  $\omega$  방정식도 운동 방정식과 유사한 방식으로 차분화하였다. 수렴 가속화 기법의 하나인 국부시간단계(local time step) 방법을 사용해서 수렴성을 향상시켰다. 비엇갈림 격자계의 사용을 통하여 경계 조건의 부가를 용이하게 하였고, 각각의 변수값들을 저장하는데서 오는 부가적인 기억장소의 필요를 감소시켰다.

## 2.4 경계 조건

$K_{TC} = 3.76$  ( $Re=20,000$ ,  $\lambda=10$ )인 경우에 대해

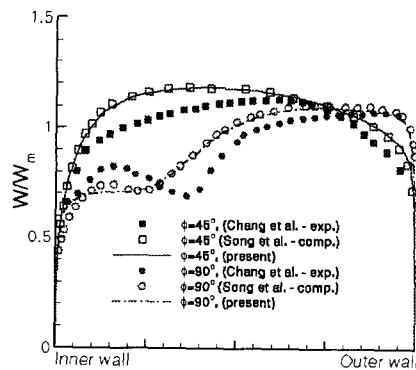
서  $Ro$ 를 '접근적인 불변 특성'<sup>(11,13,14)</sup>을 만족시키는 범위( $Ro > 8$ )내에서 변화시켜 가면서 계산을 수행하였다.  $Ro$  및  $\lambda$ 가 충분히 큰 값을 가지고 회전에 의한 코리올리력과 곡률에 의한 원심력이 동일 평면상에서 작용하므로 유동의 대칭성이 유지되기 때문에 대칭 형태의 유동 구조를 가정해서 관 단면의 절반 부분만을 계산 영역으로 정하였고,<sup>(2)</sup> 격자수는 축방향, 반경방향 및 높이방향으로  $100 \times 89 \times 45$ 개를 사용하였다. 벽 근처에서는 경계층의 영향으로 주유동과 2차 유동의 급격한 구배가 존재하게 되며, 이러한 벽 근처 유동의 정확한 해석을 위해 인접한 벽에서부터 첫 번째 격자 사이의 무차원 거리  $y^+ < 1$ 을 유지하였고,  $y^+ < 10$  범위에 대해서 최소한 8개의 격자점을 위치시켰다. 본 연구에서 사용된 격자수 및 격자 배열은 선행 연구<sup>(9,10)</sup>에서 계산된 평균 마찰계수

를 실험값<sup>(15)</sup>과 비교한 후 최적화된 것이다. 사용된 경계 조건으로는 입구에서는 별도의 직관에서 계산된 완전발달 유동을, 대칭면에서는 대칭 조건을, 벽에서는 점착(no-slip) 조건을 적용해서  $\omega$ 를 제외한 모든 속도 성분 및 난류 운동에너지를 0으로 두었다. 비소산율  $\omega$ 의 경우에는 Menter<sup>(16)</sup>에 의해서 수정 제안된 아래와 같은 조건을 부여하였다.

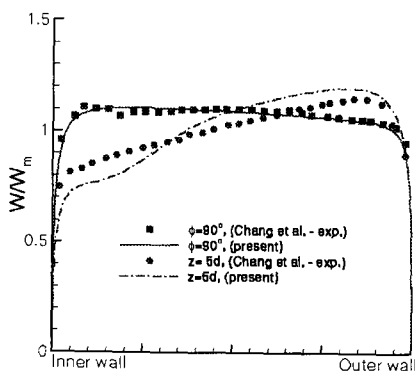
$$\omega = \frac{800\nu}{(\Delta y_1)^2} \quad (7)$$

### 2.5 코드 정확성 검증

회전 및 곡률의 영향이 고려된 정사각 단면 관 유동에 대해서 본 해석 코드의 정확성은 이미 입증된 바 있으며,<sup>(5,9,10,13,14)</sup> 본 연구에서 계산 모델로 선정된 U자형 곡관에 대해서도 정확한 결과를 얻을 수 있는지 확인하기 위해서 Chang 등<sup>(16)</sup>의 LDV 측정 결과와 비교하였다. 실험에 사용된 U자형 곡관은 곡률비가 3.35이고,  $Re=56,700$ 에서 측정이 수행되었다. Fig. 2는 대칭면( $y/d=0$ )과 벽 근처( $y/d=0.375$ )에서의 유선방향 속도 분포를 나타내며, 본 연구에서 채택한 난류 모델이 신뢰할 만한 수준으로 측정 결과를 예측하였으며, Song 등<sup>(8)</sup>이 최근에 동일한 레이놀즈수  $k-\omega$  모델을 이용해서 계산한 결과와 같은 정확도를 보여주었다.



(a)  $y/d=0$



(b)  $y/d=0.375$

Fig. 2 Computed and measured development of streamwise velocity profile in the stationary U-bend for  $Re=56,700$  and  $\lambda=3.35$

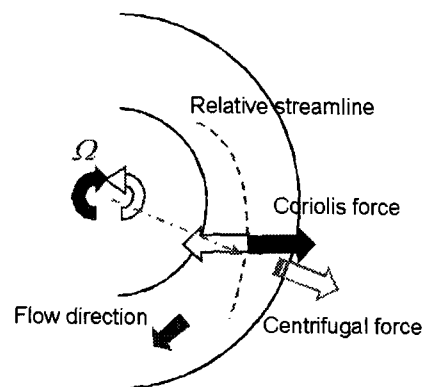


Fig. 3 Primary force components related with the secondary flows in a rotating U-bend with the direction of rotation

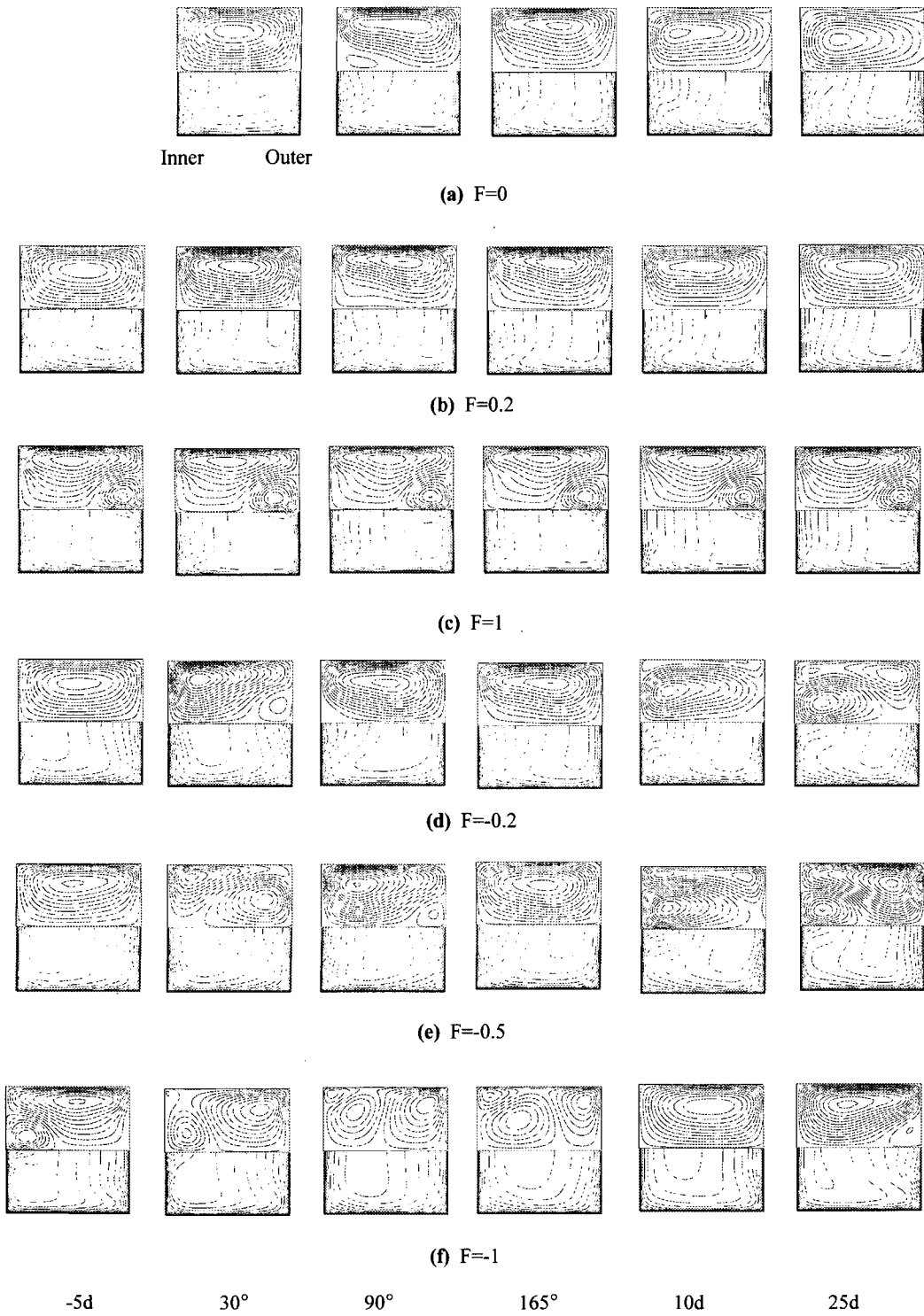


Fig. 4 Contours of secondary flow streamlines (upper) and axial velocity (lower).

### 3. 결과

#### 3.1 일반적인 유동 형태

Fig. 3은 회전하는 U자형 곡관 내부에서 2차 유동 발생과 관련된 주요한 힘 성분들이 회전 방향에 따라 작용하는 형태를 보여준다. 정회전(positive rotation)인 경우, 곡관 부분에서 주유동 방향이 회전 방향과 동일하며, 결과적으로 코리올리력과 원심력은 모두 바깥쪽벽으로 작용한다. 반면에, 역회전(negative rotation)인 경우는 곡관의 회전 방향이 주유동의 방향과 반대가 되면서 코리올리력과 원심력은 서로 상응하게 작용한다.

##### 3.1.1 정지한 경우

Fig. 4는 U자형 곡관 각 단면에서의 2차 유동의 유선 및 축방향 속도의 contour를 나타낸다. 여기서 -5d, 10d 및 25d는 각각 곡관부 입구와 출구를 기준으로 측정된 거리에 위치한 단면을 표시한다. 곡관부에서 곡률에 의한 원심력의 작용으로 유속이 빠른 곡관 중심의 유동이 바깥쪽벽으로 이동하면서 2차 유동이 형성되는 것을 볼 수 있다(Fig. 4(a)).

##### 3.1.2 정회전 (positive rotation)인 경우

유입 직관부(-5d)에서 회전에 의한 코리올리력의 영향으로 운동량이 큰 유체가 직관부의 바깥쪽벽으로 이동하면서 발생한 2차 유동은 곡관부로 유입되면서 곡률에 의한 원심력의 작용이 더해지면서 더욱 강화된다. 유출 직관부에서는 원심력의 영향이 사라지면서 2차 유동의 강도는 상대적으로 약화되지만 유동 형태는 그대로 유지된다. 한편  $F=1$ 인 경우에는 유입 직관부에서 코리올리력과 압력 구배 사이의 균형이 깨어지면서 직관부의 바깥쪽벽에서 부가적인 와류가 발생하는 '유동 불안정성(flow instabilities)' 현상을 볼 수 있다. 이러한 부가적인 와류 형태는 U자형 곡관 전체에 걸쳐서 유지된다(Fig. 4(c)).

##### 3.1.3 역회전 (negative rotation)인 경우

유입 직관부에서는 정회전하는 경우와는 반대로 직관부의 안쪽벽에 위치한 운동량이 큰 유체 영역은 유동이 곡관부로 진행하면서 원심력의 영향으로 바깥쪽벽으로 이동하게 되는데 코리올리

력의 크기가 증가할수록 느리게 진행되는 것을 볼 수 있다.  $F=-1$ 의 경우는 곡관부에서 동일한 크기를 가지면서 서로 상응하게 작용하는 코리올리력과 원심력으로 인해 2차 유동은 방향이 바뀌면서 매우 복잡한 형태를 나타낸다.

Fig. 5는  $F$ 의 크기 변화에 따른 U자형 곡관 각 단면에서 축방향 속도 최대값의 위치 변화를 개략적으로 보여준다. 먼저 정회전하는 경우( $F=0.5$ )에는 코리올리력의 영향으로 속도 최대값이 유입 직관부의 바깥쪽벽에 위치하며, 곡관부에서는 코리올리력과 동일한 방향으로 작용하는 원심력이 더해지면서 속도 최대값의 위치는 그대로 유지된다. 반면에 역회전하는 경우( $F<0$ )에는 유동이 곡관 후반부로 진행하면서 코리올리력에 상응하게 작용하는 원심력의 영향으로 회전 각속도가 작을

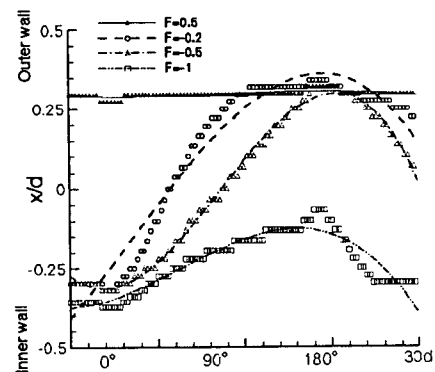


Fig. 5 Variation of the position of maximum axial velocity in each cross-section of U-bend (Lines are represented by polynomial fitting).

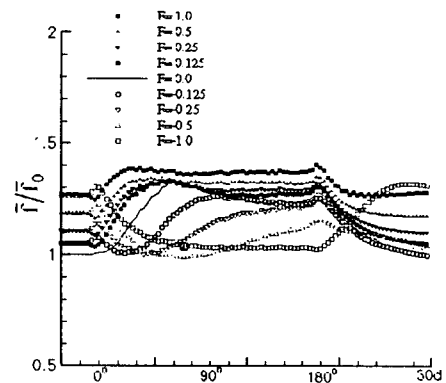


Fig. 6 Variation of friction factor ratio with  $F$

수록 원심력이 상대적으로 우세하게 작용하기 때문에 속도 최대값이 바깥쪽벽으로 먼저 이동하게 된다.  $F=1$ 인 경우는 곡관부에서 속도의 최대값이 관 중심으로 이동하다가 원심력의 영향이 사라지는 유출 직관부에서 다시 안쪽벽으로 되돌아 오는 것을 확인할 수 있다.

관 유동 해석에서 마찰계수를 정확하게 구하는 것은 압력 손실을 계산하는데 있어서 상당히 중요한 작업이다. Fig. 6은 U자형 곡관의 각 단면에서 계산된 무차원화된 평균 마찰 계수를 나타내며, 여기서  $\bar{f}_0$ 는 정지한 정사각 단면 직관에서의 평균 마찰계수이다. 정회전하는 경우( $F>0$ )에는 곡관부에서 서로 동일한 방향으로 작용하는 코리올

3.2 마찰 계수

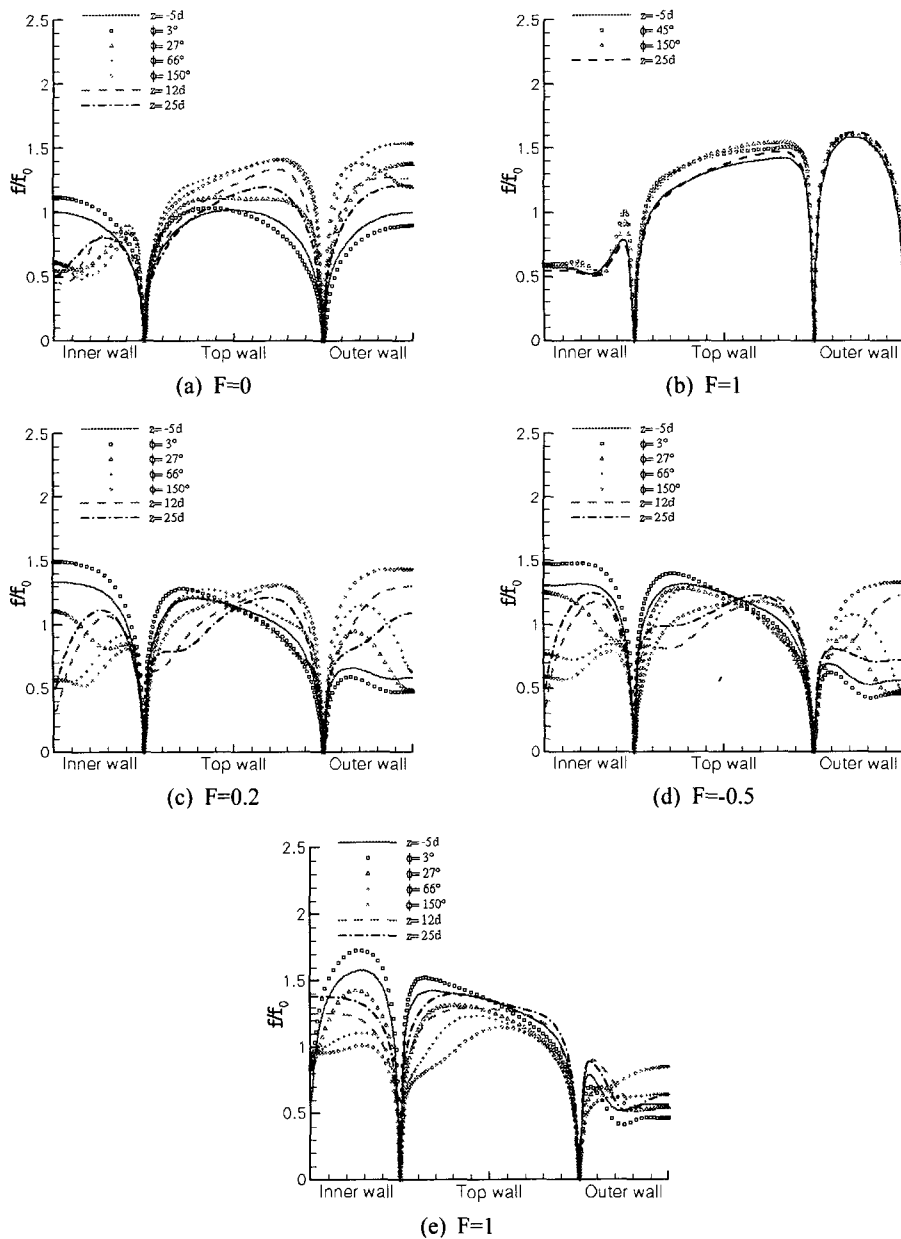


Fig. 7 Distribution of the local normalized friction factor

리력과 원심력으로 인해 2차 유동은 강화되며, 결과적으로 마찰계수는 증가하게 된다.  $F$ 가 증가할수록 평균마찰계수는 전체적으로 증가하며 곡관 전반부에서 평균 마찰계수의 최대값은 곡관 입구쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 곡관 후반부에서는 마찰계수가 거의 일정한 크기를 유지하게 된다.  $-1 < F < 0$ 인 경우는 곡관부 입구에서부터  $40^\circ \sim 50^\circ$  부근까지는 코리올리력과 원심력에 의해 발생한 2차 유동이 서로 상응하게 작용하면서 2차 유동의 강도가 약해지며, 결과적으로 마찰계수가 감소하다가 이후부터는 상대적으로 크기가 큰 원심력이 우세하게 작용하면서 마찰계수는 다시 증가하는 형태를 보여준다.  $F=1$ 인 경우를 제외하고는 유출 직관부에서 마찰계수의 값이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이것은 상대적으로 크기가 큰 원심력의 영향이 점차적으로 감소하기 때문이다.  $F=1$ 에서는 곡관부에서 동일한 크기의 원심력과 코리올리력이 서로 상응하게 작용하기 때문에 곡관 중반부 이후로 마찰계수가 일정한 크기를 유지하고 있다. 유출 직관부에서는 원심력의 영향이 점차로 사라지고 코리올리력이 우세하게 작용하면서 마찰계수가 회복하게 된다. 층류 유동<sup>(5)</sup>에 비해서 체적력(코리올리력 및 원심력)에 의한 마찰계수 크기의 증가 정도는 작게 나타났다.

평균 마찰계수의 변화 형태를 보다 자세히 알아보기 위해서 벽에서의 국부적인 마찰계수의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 가로축은 U자형 곡관 각 단면벽을 따라 진행되는 거리를 나타낸다. 먼저 정지한 경우( $F=0$ ), 곡관부로 유동이 진행하면서 원심력의 영향으로 운동량이 큰 유체가 압력면으로 이동하게 되어 바깥쪽벽 및 상부벽에서는 경계층 두께가 얇아지는 반면, 안쪽벽에서는 운동량이 작은 유체가 축척되면서 경계층이 두꺼워진다. 이러한 유선 방향 속도 분포는 마찰계수의 분포에 영향을 미치게 되며, 결과적으로 바깥쪽벽 및 상부벽에서의 마찰계수의 크기가 안쪽벽에 비해서 크게 나타났다. 정회전하는 경우( $F=1$ )는 곡관부의 상부벽에서 마찰계수가 다소 증가하는 것을 제외하고는 마찰계수의 분포는 거의 일정한 형태를 유지한다. 대칭면에 위치한 바깥쪽벽에서 마찰계수의 크기가 상당히 작은 이유는 '유동 불안정성'에 의해서 발생하는 부가적인 와류 때문이다. 역회전하는 경우( $F < 0$ )는 정회전하

는 경우와는 다르게 다소 복잡한 형태를 나타낸다.  $F=0.2$  및  $-0.5$ 인 경우, 곡관부 입구 부근( $\phi=3^\circ$ )에서 유동이 안쪽벽에서는 가속되는 반면 바깥쪽벽에서는 감속되는 것을 확인할 수 있다. 곡관 후반부로 갈수록 운동량이 큰 유체가 바깥쪽벽으로 이동하면서 마찰계수가 안쪽벽에서는 감소하는 반면 바깥쪽벽에서는 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 상부벽에서는 마찰계수의 국부적인 최대값이 바깥쪽벽으로 이동한다.  $F=1$ 에서는 운동량이 큰 유체가 안쪽벽에 머물러 있기 때문에 마찰계수의 크기가 안쪽벽에서 높게 분포된다.

#### 4. 결론

회전하는 정사각 단면 U자형 곡관 내부의 난류 유동의 발달 특성을 파악하기 위해 물리적으로 타당한 상사변수와 고차의 정확도를 가진 수치해법을 이용하여 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)  $Ro$ 와  $\lambda$ 가 충분히 큰 값을 가지는 경우 ( $Ro, \lambda > 8$ ), 회전하는 U자형 곡관 내부의 난류 유동의 발달 특성은 무차원 변수  $K_{TC}$  및 체적력비  $F$ 에 의해서 표현이 가능하였다. 여기서  $K_{TC}$ 는 층류 유동에서의 특성 무차원 변수  $K_{LC}$ 와 동일한 물리적 의미를 가진다.

(2) 회전 방향이 주유동과 동일한 경우(정회전), 곡관부에서의 유동 형태는 정성적으로 정지한 곡관 유동에서 볼 수 있는 것과 동일한 형태를 유지한 반면 회전 방향이 주유동의 방향과 반대인 경우(역회전)에는, 곡관부에 작용하는 코리올리력과 원심력의 상대적인 크기비를 나타내는 체적력비  $F$ 의 크기에 따라 유동장은 다른 형태를 나타내었다. 특히 동일한 크기의 코리올리력과 원심력이 서로 상응하게 작용하는  $F=-1$ 의 경우에는 2차 유동의 방향이 바뀌면서 상당히 복잡한 유동장 형태를 나타내었다.

본 연구에서 사용된 레일리놀즈수  $k-\omega$  모델은 회전하는 U자형 곡관 내부의 평균 유동장을 신뢰할 수 있을 정도로 예측하였지만, 보다 정확한 난류 유동 해석을 위해서는 고차의 정확도를 가지는 난류 모델의 적용이 요구되며, 이와 관련된 내용은 별도로 다루고자 한다.



## 후 기

본 연구는 BK21 지원 사업으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Choi, Y. D., Iacovides, H. and Launder, B. E., 1989, "Numerical Computation of Turbulent Flow in a Square-Sectioned 180 Deg Bend," *J. Fluids Eng.*, Vol. 111, pp. 59~68.
- (2) Iacovides, H., Launder, B. E. and Li, H-Y., 1996, "The Computation of Flow Development through Stationary and Rotating U-Ducts of Strong Curvature," *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 17, pp. 22~33.
- (3) Iacovides, H., Launder, B. E. and Li, H-Y., 1996, "Second-Moment Computations of Flow and Heat Transfer through U-Bends of Moderate Curvature," *Eng. Turbulence Modelling & Experiments*, Vol. 3, pp. 19~27.
- (4) Song, B. and Amano, R. S., 2000, "Application of Non-Linear  $k-\omega$  model to the Turbulent Flow inside a Sharp U-Bend," *ASME 2000-GT-225*.
- (5) 이공회, 백제현, 2001, "회전하는 정사각 단면 U자형 곡관 내부의 유동 발달에 관한 수치적 연구(I) - 층류 유동," 대한기계학회논문집(B), 게재승인.
- (6) Wilcox, D. C., 1994, "Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model," *AIAA J.*, Vol. 32, pp. 247~255.
- (7) Stephens, M. A. and Shih, T. I-P., 1999, "Flow and Heat Transfer in a Smooth U-Duct with and without Rotation," *J. Prop. & Power*, Vol. 15, pp. 272~279
- (8) Song, B., Liu, G. R. and Amano, R. S., 2001, "Applications of a Higher-order bounded Numerical Scheme to Turbulent Flows," *Int. J. Num. Methods Fluids*, Vol. 35, pp. 371~394.
- (9) 이공회, 백제현, 2001, "수직축을 중심으로 회전하는 직관과 정지한 곡관 내에서의 완전 발달된 난류 유동의 유사성에 관한 수치적 연구" 대한기계학회논문집(B), 제25권 제5호, pp.731~740.
- (10) Lee, G. H. and Baek, J. H., 2001, "A Numerical Study of the Similarity of Fully Developed Turbulent Flows in Orthogonally Rotating Square Ducts and Stationary Curved Square Ducts," accepted to *Int. J. Num. Methods Heat & Fluid Flow*.
- (11) Ishigaki, H., 1996, "Analogy between Turbulent Flows in Curved Pipes and Orthogonally Rotating Pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 307, pp. 1~10.
- (12) Schlichtig, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, pp. 600.
- (13) 이공회, 백제현, 2000, "수직축을 중심으로 회전하는 직관과 정지한 곡관내에서의 층류 유동의 유사성 비교," 대한기계학회논문집(B), 제24권 제12호, pp.1683~1691.
- (14) Lee, G. H. and Baek, J. H., 2001, "Similarity Comparison of Laminar Flows between in Orthogonally Rotating Square Duct and Stationary Curved Square Duct," to be issued on *Int. J. Rotating Machinery*.
- (15) Moore, J., 1967, "Effects of Coriolis on Turbulent Flow in Rotating Rectangular Channels," MIT Gas Turbine Lab. Report, No. 89.
- (16) Menter, F. R., 1993, "Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows," *AIAA-93-2906*.
- (17) Chang, S. M., Humphrey, J. A. C. and Modavi, A., 1983, "Turbulent Flow in a Strongly Curved U-Bend and Downstream Tangent of Square Cross-Sections," *Phy. Chem. Hydrodyn.*, Vol. 4, pp. 243~269.