

## 직관과 연결된 나선관 입구영역의 층류 유동

김영인\* · 박종호\*\*

### Laminar Flow in the Entrance Region of Helical Tubes Connected with Straight Ones

Young-In Kim\* and Jong-Ho Park\*\*

*Key Words* : Helical tube(나선관), Laminar(층류), Developing flow(발달유동), CFD(전산유체역학), Fluent, Characteristic angle(특성각), Characteristic length to diameter ratio(특성 길이 대 직경비)

#### ABSTRACT

A numerical study for three-dimensional laminar flow in the entrance region of helical tubes connected with straight ones is carried out to investigate the effects of Reynolds number, pitch and curvature ratio on the oscillation periods of the flow. The fully elliptic governing equations were solved by means of a finite volume method. The fully developed laminar flow boundary condition was applied at the straight tube inlet. This results cover a curvature ratio range of 1/10~1/320, a pitch range of 0.0~3.2, and a Reynolds number range of 62.5~2000. A comparison is made with previous experimental correlations and numerical data. The developments of velocity, local and average friction factors are discussed. The average friction factors are oscillatory in the entrance region of helical pipes. It has been found that the angle required for the flow to be similarly developed is most affected by the curvature ratio. The pitch and Reynolds number do not have any significant effect on the angle. The characteristic angle  $\phi_c (= \phi / \sqrt{\delta})$ , or the characteristic length to diameter ratio  $s_c (= l \sqrt{\delta} \cos(\text{atan}\lambda) / d)$ , can be useful to represent the development of flow in helical tubes. As the pitch increases and as the curvature ratio and Reynolds number decrease, the amplitude and the number of flow oscillations along the main streamwise direction decrease.

#### 1. 서론

원형단면의 나선관은 혈관뿐만 아니라, 각종 배관계통, 열교환기, 증기발생기, 저장탱크, 냉각장치, 화학반응로 및 다양한 산업분야에 광범위하게 사용된다. 나선관에서는 단면상의 위치와 유속차로 인해 형성되는

원심력에 차이가 생기고, 원심력 차에 의해 나선관 단면 상하에는 이차 회전유동이 형성된다. 이차유동으로 인해 나선관에서는 직관에 비해 열전달과 혼합 성능이 향상되는 반면, 유로저항은 증가한다. Dean<sup>(1,2)</sup>은 곡률이 작고 피치가 0인 토러스 배관 내부의 완전발달유동에 대해 이론적으로 연구하고, 나선관 내부의 유동특성이 무차원수 Dean number  $De (= Re \sqrt{\delta})$ 에 의존한다는 것을 발표했다. 여기서  $\delta (= a/R)$ 는 곡률,  $a$ 는 배관의 반경,  $R$ 은 나선관이 감긴 코일 반경,  $Re$ 는 레이놀

\* 한국원자력연구원

\*\* 충남대학교 기계공학과

E-mail : yikim3@kaeri.re.kr

즈수를 나타낸다.

나선관 내부 열유동에 대한 광범위한 검토가 Berger 등<sup>(3)</sup>, Ito<sup>(4)</sup>, Naphon과 Wongwises<sup>(5)</sup> 등에 의해 수행되었다. 나선관 관련 연구의 대부분은 토러스 배관의 완전발달 열유동에 집중되어 있으며, 입구근처의 발달과정 열유동에 관련된 연구는 매우 부족하다. 또한 발달과정의 열유동 관련 연구도 토러스 배관의 열전달에 대한 것이 대부분이며, 피치가 큰 나선관의 발달과정의 유동에 대한 자료는 매우 제한적이다.

나선관 입구의 발달과정의 열유동에 대해 Yao와 Berger<sup>(6)</sup> 등은 이론적으로 Austin<sup>(7)</sup>, Dravid 등<sup>(8)</sup> 등은 수치해석과 실험을 통해, Austin과 Seader<sup>(9)</sup>, Olson과 Snyder<sup>(10)</sup> 등은 실험을 통해, Patankar 등<sup>(11)</sup>, Liu와 Masliyah<sup>(12)</sup>, Soh와 Berger<sup>(13)</sup>, Lin 등<sup>(14)</sup> 등은 수치해석을 통해 분석하였다.

Yao와 Berger<sup>(3)</sup>는 피치가 작은 나선관 입구에 일정 유속을 적용한 경우에 대해 해석적으로 연구해,  $De$ 이 클 때 입구 발달길이 직관에 비해  $De^{-1/2}$ 의 비율로 짧아지는 것을 보였다. Patankar 등<sup>(11)</sup>은 피치가 작은 나선관에서 입구에 포물선형(parabolic) 유속을 적용하고 열의 발달과정에 대해, Liu와 Masliyah<sup>(12)</sup>는 피치가 큰 나선관에서 열유동의 동시발달과정에 대해, 축방향에 대해 포물선형 지배방정식을 적용하여 단순화하고 유한차분법을 사용해 해석했다. Lin 등<sup>(14)</sup>은 피치가 큰

나선관에서 유동과 열이 동시에 발달하는 경우에 대해, 축방향에 대해 완전타원형(fully elliptic) 지배방정식을 적용하고 제어체적유한요소법을 사용해 피치, 곡률, 레이놀즈수의 영향을 분석했다.

발달과정의 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른 마찰계수 또는 Nusselt수의 공간적인 변동(oscillation) 현상은 Dravid 등<sup>(8)</sup>, Patankar 등<sup>(11)</sup>, Lin 등<sup>(14)</sup> 등의 연구에서 나타난다. Lin 등<sup>(14)</sup>의 연구를 포함해 이들 대부분의 연구에서는 발달과정의 열유동이 주유동 흐름 방향으로의 거리에 따라 변동하는 것으로 보고하고 있으나, 규칙성은 발견할 수 없다.

본 논문은 다양한 형태의 나선관에서 나선관 입구로부터 유동의 완전발달영역까지, 나선관의 길이(또는 각도)와 유동의 발달 관계를 수치해석을 통해 규명하기 위한 것이다. 이 관계는 인체의 혈관, 나선관의 입구와 일반 배관의 곡관부에 대한 각종 열수력 변수의 정확한 예측을 위해 활용될 수 있다. 해석범위는 곡률  $1/10 \sim 1/320$ , 피치  $0.0 \sim 3.2$ , 레이놀즈수  $62.5 \sim 2000$  범위이다.

## 2. 수치해석 방법

나선관의 형상 및 격자를 Fig. 1에 도시하였다. 나선관의 반경은  $a$ , 직경은  $d$ , 나선관이 감긴 코일의 반경은  $R$ , 코일의 피치(회전 간극)는  $H$ 이다. 나선관 입구로부터 축방향( $z$ )을 따라  $10d$ 까지는 직관을 설치한다. 유동은 정상상태 비압축성으로 가정한다. 나선관 내부의 층류유동을 지배하는 완전타원형 지배방정식을 텐서(tensor) 형태로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

운동량방정식

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

유체는 포물선형 축방향 속도분포를 갖고 직관입구로 유입되며, 입구에서 축방향 유속을 제외한 모든 방향의 유속은 0이다. 나선관 출구에서 축방향의 모든 변화는  $0(\partial u_i / \partial n = 0)$ ,  $u_i$ 는 모든 변수,  $n$ 은 축방향)으로 설정된다. 나선관의 벽면에는 non-slip 경계조건이 사

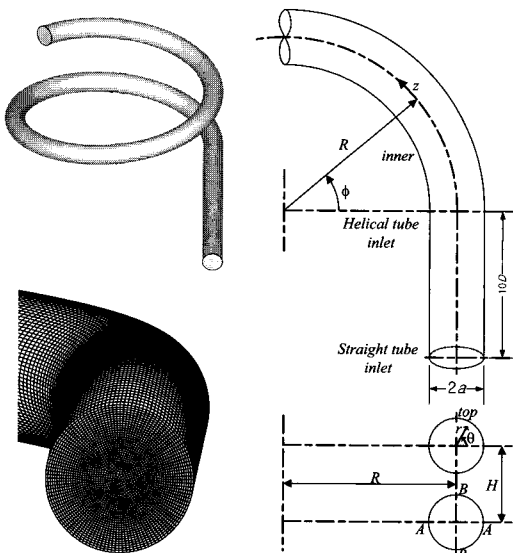


Fig. 1 Geometry and grid

용된다. 나선관에서는 발달유동을 기술하기 위해 유동이 완전히 발달하는데 필요한 길이를 나타내는 완전발달길이나 이 완전발달길이를 나선관이 감긴 코일의 각도( $\phi$ )로 나타내는 완전발달각이 사용된다. 본 논문에서 사용한 나선관의 길이는 Austin과 Seader<sup>(9)</sup>의 완전발달각에 대한 실험결과를 참조하고, 본 논문에서 계산된 모든 경우에 대해 유동이 완전히 발달될 수 있도록 수치해석을 통한 수정과정을 거쳐 선정된다.

결과를 나타내기 위해 다음과 같은 변수가 사용된다.

$$Re = \frac{\rho u_0 d_h}{\mu}, \quad \delta = \frac{a}{R}, \quad \lambda = \frac{H}{2\pi R}, \quad (3)$$

$$f_\theta = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho u_0^2}, \quad f_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_\theta d\theta$$

$$\phi_c = \frac{\phi}{\sqrt{\delta}}, \quad s_c = l\sqrt{\delta} \cos(\text{atan}\lambda)/d \quad (4)$$

$$\phi_{ref} = \phi \sqrt{\frac{\delta_{ref}}{\delta}}, \quad l_{ref} = l \frac{\sqrt{\delta} \cos(\text{atan}\lambda) d_{ref}}{\sqrt{\delta_{ref}} \cos(\text{atan}\lambda_{ref}) d}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $u_0$ 는 입구의 평균유속,  $d_h (=2a)$ 는 수력직경,  $\mu$ 는 점성계수,  $\delta$ 는 곡률,  $\lambda$ 는 무차원 피치,  $f_\theta$ 는 주유동의 흐름방향과 수직인 단면에서의 국부 마찰계수,  $\tau_w$ 는 벽면의 전단응력,  $f_m$ 은 주유동의 흐름방향과 수직인 단면에서의 평균 마찰계수,  $\phi_c$ 는 곡관의 특성각,  $\phi_{ref}$ 는 곡관의 참조각,  $s_c$ 는 곡관의 특성 길이 대 직경비,  $l_{ref}$ 는 곡관의 참조 길이를 나타낸다. 아래 첨자  $ref$ 는  $\delta=1/20$ ,  $\lambda=0.1$ ,  $d=12\text{ mm}$ 인 경우이다.

지배방정식을 이산화하기 위해 Fig. 1과 같은 비정렬 비균일 격자가 사용된다. 지배방정식을 해석하기 위해 유한체적법(Finite-Volume Method: FVM)을 이용한 상용 FLUENT 6.3<sup>(15)</sup>이 사용된다. 지배방정식의 대류항에 대해서는 이차상류차분법이 사용된다. 대수방정식은 Gauss-Seidel 이완기법과 AMG(algebraic multi-grid) 기법을 사용하여 반복적으로 해석된다. 속도와 압력을 연계해석하기 위해 SIMPLE 알고리즘이 사용된다. 수렴가속을 위해 모든 변수에 대해 하향이완(under relaxation)기법이 적용된다( $p=0.3$ ,  $u_i=0.7$ ).  $N$  번째 계산에서 모든 변수( $\phi$ )에 대한 모든 격자점에서 잔차(residual)  $R_N^\phi$ 이  $R_N^\phi/R_m^\phi < 10^{-8}$ ( $R_m^\phi$ 은  $m$ 번째 계산에서의 최대 잔차)의 조건을 만족하는 것을 수렴기준으로 사용된다.

Table 1 Grid sensitivity

| $\lambda$ | $\delta$ | grid              | Pressure       | $f_m$         |
|-----------|----------|-------------------|----------------|---------------|
|           |          | sectional×(axial) | max. error[%]  | max. error[%] |
| 0.1       | 0.025    | 0683×(40+525)     | 4.9            | 3.8           |
|           |          | 1230×(40+525)     | 2.5            | 1.8           |
|           |          | 1992×(40+525)     | 1.0            | 0.6           |
|           |          | 2851×(40+525)     | 0.5            | 0.3           |
|           |          | 4840×(40+525)     | reference grid |               |
|           |          | 2851×(16+140)     | 4.6            | 0.6           |
|           |          | 2851×(24+210)     | 3.1            | 0.1           |
|           |          | 2851×(32+280)     | 3.2            | 0.1           |
|           |          | 2851×(36+350)     | 1.6            | 0.0           |
|           |          | 2851×(40+525)     | 0.7            | 0.0           |
| 3.2       | 0.025    | 2851×(40+525)     | 3.0            | 0.2           |
|           |          | 4840×(50+700)     | reference grid |               |
| 0.1       | 0.1      | 2851×(40+525)     | 1.8            | 0.1           |
|           |          | 4840×(50+700)     | reference grid |               |

많은 실험에서 나선관 입구에 직관을 연결해 직관의 완전발달 포물선형 유동을 나선관의 입구조건으로 사용하고 있다. Austin<sup>(7)</sup> 실험에서는 나선관 입구 유속 분포가 직관의 완전발달 포물선형 분포와 차이를 보인다. 따라서 본 논문의 입구경계조건은 곡관 앞에 직관을 연결하고 직관입구에 완전발달 포물선형 유동을 적용하여, 유동이 완전발달 직관유동으로부터 완전발달 나선관유동으로 발달해가는 과정을 모사한다.

나선관에서는 단면의 상하에 이차회전유동이 출현하며, 유동 및 형상 조건에 따라 이차회전유동의 유동면적이 변화하므로 이차회전유동을 모두 고려하여 단면격자를 구성하기는 어렵다. 가능한 한 많은 부분이 유선을 따라 갈 수 있도록 격자가 구성된다. 축방향( $z$ )에 수직인 원형 단면격자는 정렬격자의 격자구성방식과 유사하게 단면을 5개로 나누어 구성하고, 바깥의 4개 단면에는 방사형격자가 사용된다(Fig. 1). 4개 단면의 면적은 전체의 64%를 차지한다. 중앙의 1개 단면에는 사각격자가 사용된다. 모든 격자는 단면격자를 축방향으로 연장시킨 프리즘 형태의 육면체격자이다.

$Re=2000$  조건에 대한 격자민감도조사 결과를 Table 1에 요약한다. 전계산영역에서 평균마찰계수는 0.5%이하,  $\phi_{ref}=30^\circ$  간격으로 조사한 단면평균 국부압력차는 3%이하가 되도록 격자를 선정한다. 단면평균 국부압력

차에는 압력분포를 단면에 대해 평균하는 과정에 발생하는 에러가 포함되어 있어 평균마찰계수보다 오차가 증가한다. 선정격자는 2851×(40+525)로 유선 방향과 수직인 단면의 격자는 2851개, 직관의 축방향 격자는 40개, 나선관의 축방향 격자는  $\phi_{ref}=2/3$  간격으로 525개이다. 해석기법 또는 격자민감도조사 방법의 차이에 기인해 선정격자는 Patankar 등<sup>(11)</sup>, Soh와 Berger<sup>(13)</sup>, Lin 등<sup>(14)</sup>의 격자와 큰 차이를 보이며, Lin 등<sup>(14)</sup>에 비해 단면격자가 약 5배, 축방향 격자는 약 3배 많다. 곡률 또는 피치가 변하는 경우에는 직관과 나선관의 축방향 격자 크기에 차이가 생긴다. 직관과 나선관이 만나는 교점 부근의 직관격자를 나선관과 유사하게 구성하고 직관입구까지는 축방향 격자 분포가 조절된다.

### 3. 검증계산

Fig. 2에는 곡관입구에 직관을 연결한 Austin<sup>(7)</sup>의 실험데이터와 곡관입구에 포물선형 축방향 속도분포를 가정하고 포물선형방정식을 유한차분법을 이용해 해석한 Patankar 등<sup>(11)</sup>의 결과를 비교하였다. 예측결과는 Patankar 등<sup>(11)</sup>의 해석결과와 매우 유사하고, Austin<sup>(7)</sup>의 실험데이터와는 다소 차이를 보인다. 그러나 복잡한 형상으로 인한 계측 오차를 고려하면 Austin<sup>(7)</sup>의 데이터와도 유사하다.

Fig. 3에는 완전발달마찰계수에 대한 예측결과를 White<sup>(16)</sup>, Hasson<sup>(17)</sup>의 실험상관식과 비교하였다. 예측

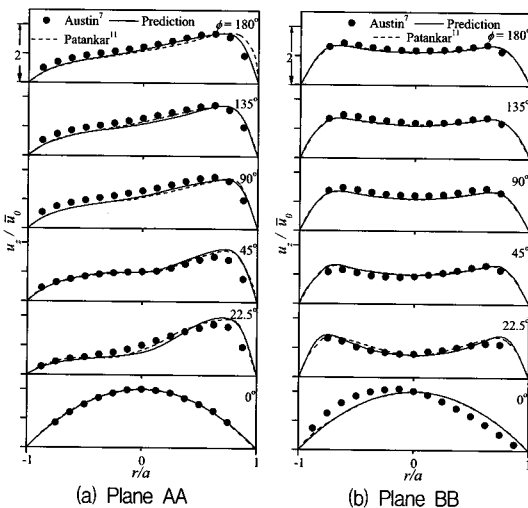


Fig. 2 Axial velocity at  $De=198$ ,  $\delta=10/291$  and  $\lambda \sim 0$

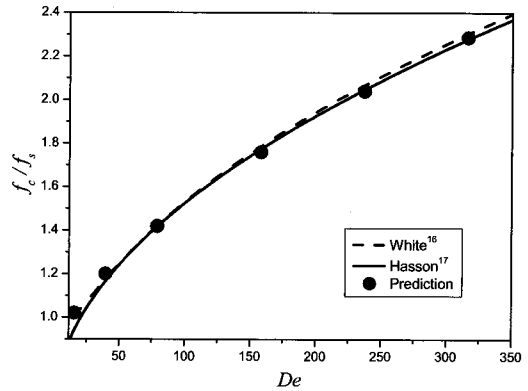


Fig. 3 Comparison of fully developed friction factor  $f$  with experimental correlations.  $f_c$ , curved tube values;  $f_s$ , straight tube values.

결과는 최대 오차 3% 이내로 White<sup>(16)</sup>의 실험상관식과 전 범위에서 유사하고, Dean number가 큰 경우 ( $De > 70$ )에서는 Hasson<sup>(17)</sup>의 실험상관식과 더 근접했다. Hasson<sup>(17)</sup>에서는 상관식의 유효범위에 대해서는 기술하지 않았으나  $De < 30$ 에서는 예측 및 White<sup>(16)</sup>의 상관식과 차이를 보였다. 이 범위를 제외하면 전반적으로 예측결과는 실험상관식과 잘 일치한다.

### 4. 해석결과

#### 4.1 직관부

Fig. 4에는 직관의 국부마찰계수  $f_\theta$ 를 평균마찰계수  $f_m$ 으로 정규화한  $f_\theta/f_m$ 의 변화를, Fig. 5에는 형상 및

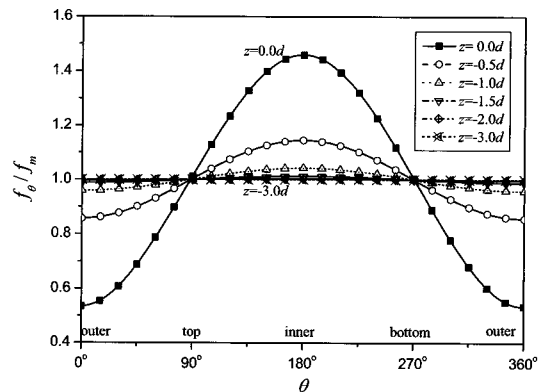


Fig. 4 Development of local friction factor on the circumference of a straight tube. ( $Re=2000$ ,  $\lambda=0.1$ ,  $\delta=1/10$ )

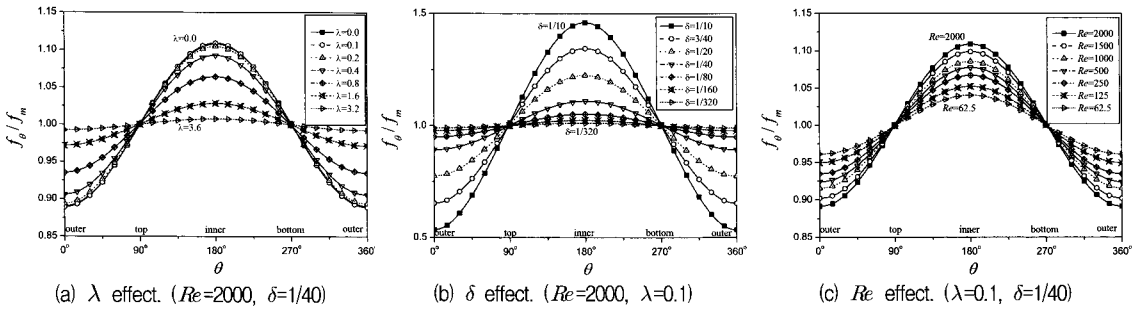


Fig. 5 Local friction factor on the circumference of a helical tube at  $\phi_{ref} = 0^\circ$  (helical tube inlet).

유동별 곡관입구의  $f_{\theta}/f_m$  분포를, Fig. 6에는 곡관입구 근처의 속도벡터를 나타냈다. Fig. 4와 Fig. 5에서 곡관입구에 가까워질수록 내벽 쪽의  $f_{\theta}/f_m$ 가 크게 나타난다. 이는 직관으로부터 곡관으로 유체가 유입될 때, 직관과 곡관의 교점 부근의 외벽 쪽의 정압은 상승하고

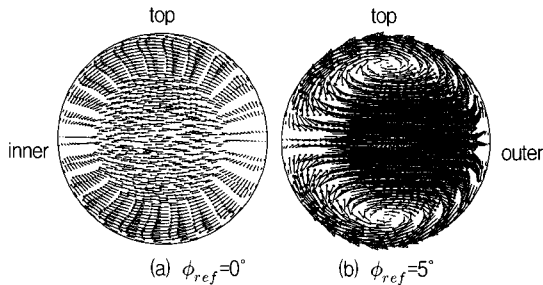


Fig. 6 Development of the secondary velocity vector. ( $Re=2000, \lambda=0.1, \delta=1/10$ )

내벽 쪽의 정압은 감소해서, 유체는 정압이 낮은 내벽 쪽에서 빠르게 흐르고, 이에 따라 내벽 쪽의 마찰계수가 증가하기 때문이다. 곡률  $\delta$ 와 레이놀즈수  $Re$ 가 크고, 피치  $\lambda$ 가 작을수록 주 유동이 내벽으로 편향되는 정도는 증가한다(Fig. 5). 이는  $Re$ 가 클수록 관성이 증

가하고,  $\delta$ 가 크고  $\lambda$ 가 작을수록 배관형태가 직관에서 곡관으로 바뀌기 때문이다.

본 논문의 해석범위 내에서 내벽으로의 주유동의 편향이 가장 큰 경우는  $\lambda=0.1, \delta=1/10, Re=2000$ 인 경우로, 이때에는 직관과 곡관의 교점으로부터 약  $3d$  앞에서 내벽보다 외벽 쪽의 정압이 미세하게 커지기 시작하고, 약  $2d$  앞에서 내벽과 외벽의  $f_{\theta}/f_m$ 의 차가 미세하게 나타나기 시작하며,  $1d$  앞에서부터  $f_{\theta}/f_m$ 의 차가 커진다(Fig. 4). 약  $3d \sim 0d$ 에서 직관부의 이차유동은 모두 내벽 쪽을 향하며, 외벽 쪽에는 source 내벽 쪽에는 sink 형태의 유동구조가 나타난다(Fig. 6(a)).

## 4.2 곡관부

유체는 나선관으로 유입된 직후부터 원심력의 영향을 받는다. 유속이 빠른 주유동은 원심력을 크게 받아 외벽 쪽으로 향하고, 이로 인해 나선관 단면에는 중심으로부터 외벽과 상하벽과 내벽 쪽을 거쳐 다시 중심으로 향하는 두 개의 이차유동이 형성된다(Fig. 6(b)).

Fig. 7에는 곡관 입구근처의  $f_{\theta}/f_m$ 의 변화를 그리고 Fig. 8에는 Fig. 1 A-A 선상의 축방향유속을 입구평균

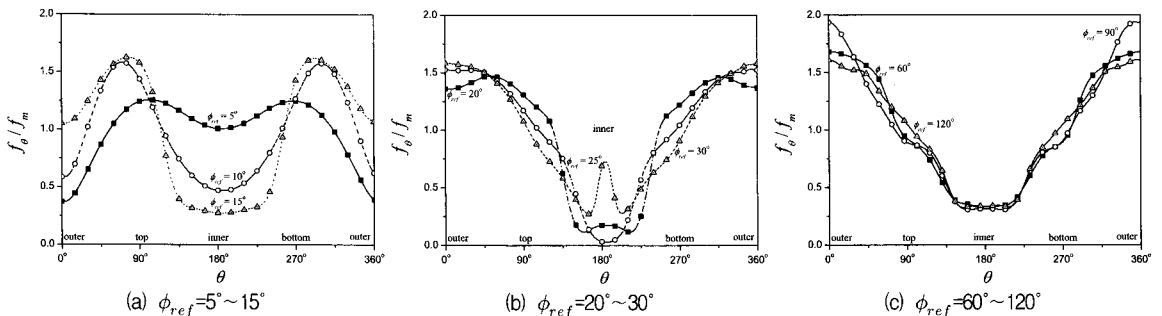


Fig. 7 Development of local friction factor on the circumference of a helical tube. ( $Re=2000, \lambda=0.1, \delta=1/10$ )

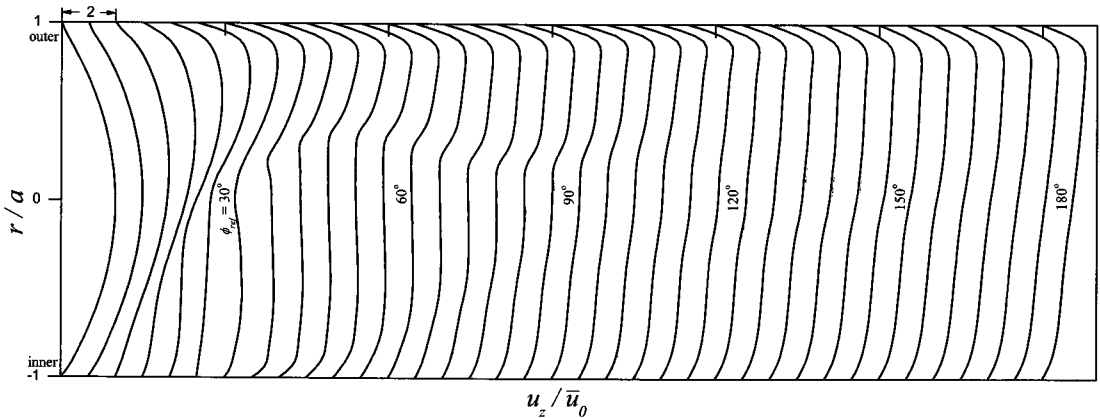


Fig. 8 Development of axial velocity at  $Re=2000$ ,  $\lambda=0.1$ ,  $\delta=1/10$  in the plane AA.

유속으로 정규화한  $u_z/\bar{u}_0$ 의 발달과정을  $\phi_{ref}$ 에 대해 5° 간격으로 나타냈다.  $\phi_{ref}=5^\circ$ 에서는, 주유동이 원심력의 영향을 받아 내벽에서 외벽 쪽으로 이동하는 과정에 있으며,  $f_\theta/f_m$ 는 상하벽에서 가장 크고 아직까지는 외벽 보다 내벽 쪽이 크다. 내벽 쪽으로 편향되어 곡관으로 유입된 주유동은 약  $\phi_{ref}<10^\circ$ 에서 원심력의 영향으로 외벽 쪽의  $f_\theta/f_m$ 가 내벽 쪽보다 더 커진다.  $\phi_{ref}$ 가 증가함에 따라, 점차 이차유동이 강해지고 주유동은 외벽 쪽으로 더욱 이동하며 이에 따라  $f_m/f_{st}$ 가 증가한다(Fig. 9).  $\phi_{ref}=25^\circ$ 에서 외벽의  $f_\theta/f_m$ 가 가장 커지며, 최대  $f_m/f_{st}$ 는 외벽 쪽으로 편향된 주유동의 속도가 가장 빠른  $\phi_{ref}=25^\circ\sim 30^\circ$ 에서 나타난다.  $f_m/f_{st}$ 의 최대점 이후 일시적으로 주유동은 외벽 쪽으로 더욱

편향되나 주유동의 속도가 감소하고, 내벽 쪽과 중심부의 속도가 증가하면서  $f_m/f_{st}$ 은 감소하기 시작한다(Fig. 8, 9). 이 때 축방향속도의 최대점이 외벽과 내벽 쪽에 각각 한 개씩 나타나고, 이후 중심부근에는 평탄한 속도분포가 나타나고, 이 평탄영역은  $\phi_{ref}\sim 50^\circ$ 에서 최대가 된 후 점차 감소한다(Fig. 8). 내, 외벽 쪽과 중심부의 유속의 완전발달유동과의 불균형을 맞추어가는 과정에서  $f_m/f_{st}$ 가 주유동 흐름방향으로의 거리에 따라 변동한다. 약  $\phi_{ref}>150^\circ$  이후 축방향유속의 변동은 매우 작아진다.

#### 4.3 곡률( $\delta$ ) 영향

Fig. 9에는  $Re$ 와  $\lambda$ 가 일정한 경우의 주유동의 흐름 방향과 수직인 단면에서의 평균마찰계수  $f_m$ 을 직관의

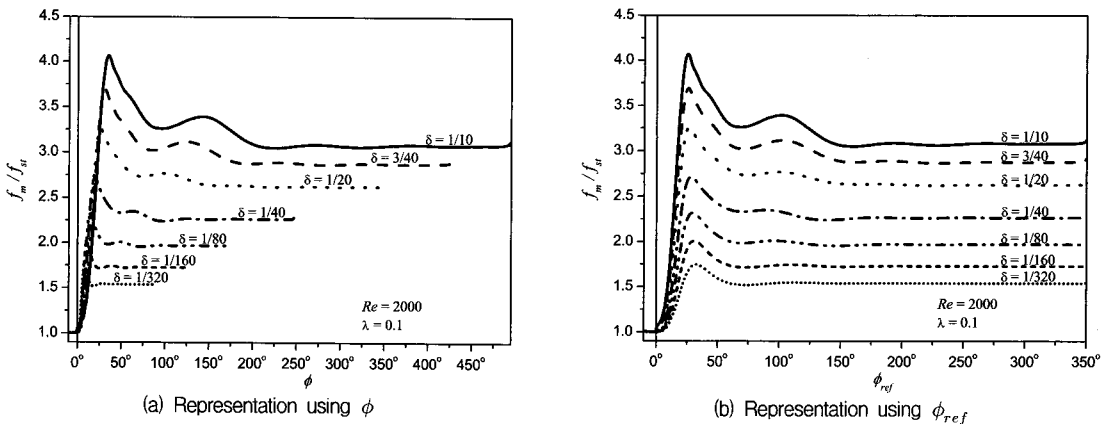


Fig. 9 Effects of curvature ratio on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

마찰계수  $f_{st}$ 로 정규화한  $f_m/f_{st}$ 의 발달과정에 대한 곡률  $\delta$ 의 영향을  $\phi$ 와  $\phi_{ref}$ 에 대해 나타내었다.  $\phi_{ref}$ 는  $\delta=1/20$  일 때의 각도  $\phi$ 를 나타낸다.

Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 나타난 바와 같이 식 (4)를 이용해  $\phi$ 를  $\phi_{ref}$ 로 변환해 사용함으로써  $\delta$ 에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 발달과정의 변화를 용이하게 나타낼 수 있는 것으로 밝혀졌다.  $\delta$ 의 변화에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 주기적 거동은  $\phi_{ref}$ 에 따라 매우 유사한 거동을 보인다.  $\delta$  변화시 주유동 흐름방향으로의 거리에 따라 마찰계수가 변동하는 거동을  $\phi_{ref}$ 로 나타내는 경우  $f_m/f_{st}$ 의 변동주기가 일정하다는 것은,  $\delta$ 가 감소하는 경우, 나선관 직경( $d$ )이 동일하면 변동주기가  $\phi = \phi_{ref} \sqrt{\delta_{ref}/\delta}$ 의 관계로 짧아지고, 변동길이는  $l = l_{ref} \sqrt{\delta/\delta_{ref}}$  관계로 증가하는 것을 의미한다. 본 논문에서 사용한  $\delta$ 가 1/10, 1/320일 때 나선관 입구에서 출구까지의 총 각도( $\phi$ )는 약 495°, 87°이며, 길이( $l$ )은 약 43*d*, 277*d*로서 크게 차이가 난다. 이러한 각도 및 길이의 큰 차이에도 불구하고,  $\delta$ 의 변화에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동주기가  $\phi_{ref}$ 에 대해 유사성을 갖는 것은 매우 고무적이다(Fig. 9).

본 논문에서는  $Re$ 와  $\lambda$ 가 일정한 경우의  $\delta$ 의 변화에 따른 유동의 주기적인 특성변화를 입구로부터 완전발달영역까지 전영역에 대해 식 (4)에 정의한  $\phi_{ref}$ 를 사용해 나타내었으나, 식 (4)에 정의한 특성각이나 특성길이 대 직경비(또는 참조 길이)를 사용해 나타내는 경우에도 동일하게 주유동 흐름방향으로의 거리에 따라 주기적으로 유동이 변동하는 거동을 얻을 수 있다.

$\delta$ 가 감소하면  $f_{fd}/f_{st}$ (완전발달  $f_m/f_{st}$ )와 발달과정의 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동폭(크기)은 감소하며, 이에 따라 변동횟수도 감소한다. 그러나  $\phi_{ref}$ 로 나타낸 변동주기는 크게 변하지 않는다.  $\delta$ 가 큰 경우, 직관으로부터 곡관으로 유입된 유동에서  $f_m/f_{st}$ 는  $\phi_{ref} < 290^\circ$ 에서 천이과정을 포함해 약 4회 감소변동 후 변동이 소멸되고 완전히 발달된다. 그러나  $\delta$ 가 감소함에 따라 변동폭이 약해져  $\delta=1/320$ 에서는 3~4차 변동은 거의 나타나지 않았다.  $\delta$ 가 감소하면  $f_{fd}/f_{st}$ 와  $f_m/f_{st}$  변동폭이 감소하는 것은  $\delta$ 가 감소하면 배관의 형태가 직관( $\delta=0$ )의 형태로 가까워지는 것으로 설명된다.  $\delta$ 가 감소하는 경우  $f_m$ (또는  $f_m/f_{st}$ )이 감소하는 경향은 경계조건으로 입구에 일정한 유속을 사용한 Lin 등<sup>(14)</sup>과 유사하다. 그러나 Lin 등<sup>(14)</sup>은  $\delta$ 에 따른  $f_m$ 의 변화를  $\phi_{ref}$ 를 사용하지 않고  $\phi$ 를 사용해

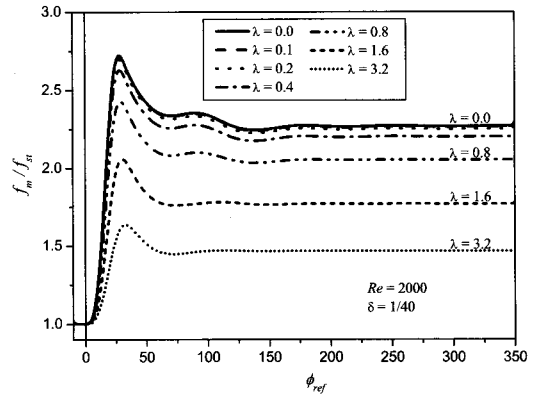


Fig. 10 Effects of pitch on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

나타냄으로써 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m$ 의 변동거동의 유사성을 발견할 수 없었다.

#### 4.4 피치( $\lambda$ ) 영향

Fig. 10에는  $Re$ 와  $\delta$ 가 일정한 경우의  $f_m/f_{st}$ 의 발달 과정에 대한  $\lambda$ 의 영향을 나타내었다. 일정한 입구 유속을 사용한 Lin 등<sup>(14)</sup>에서는 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m$ 의 변동거동이 불규칙했으나, 곡관에 직관을 연결한 본 논문의 예측결과는 매우 규칙적이다.

$\lambda$ 가 증가하면서 나타나는 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동거동은  $\delta$ 가 감소하는 경우와 유사하다.  $\lambda$ 가 증가하면서  $f_{fd}/f_{st}$ 와  $f_m/f_{st}$ 의 변동폭이 감소하며 이에 따라 변동횟수도 감소한다. 그러나 변동주기는 크게 영향을 받지 않는다.  $\lambda$ 가 증가하면서  $f_m/f_{st}$ 의 천이과정을 포함한 1차, 2차 변동주기는 다소 증가하는 경향을 보이나, 3차, 4차 변동주기 차이는 감소한다. 이에 따라 특성각(또는 참조각)에는  $\lambda$ 의 영향을 고려하지 않는다.

각도( $\phi_{ref}$  또는  $\phi_c$ )와 나선관 직경( $d$ )이 동일한 경우  $\lambda$ 가 증가하면 나선관 길이는  $\sqrt{[H^2 + (\pi d)^2]}$  비로 증가한다. 나선관 길이는  $\lambda=0$ 일 때 보다  $\lambda=0.8$ 일 때는 약 1.3배,  $\lambda=3.2$ 일 때는 약 3.4 배 길다. 이러한 길이변화에도 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동주기의 변화는 매우 작다는 것은 매우 고무적이다.  $\lambda$ 는 특성각(또는 참조각)에는 크게 영향을 미치지 않으나  $\lambda$ 가 변하면 나선관 길이가 변하므로 특성 길이 대 직경비(또는 참조길이)에는 식 (4)의 관계에 따라  $\lambda$

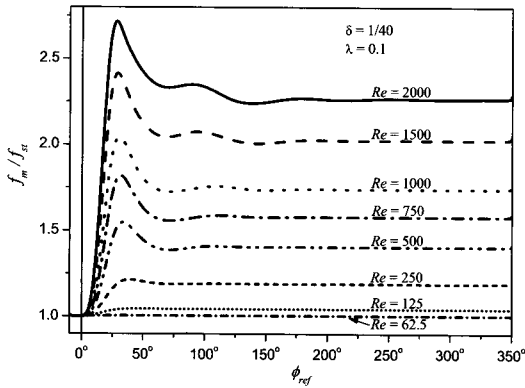


Fig. 11 Effects of Reynolds number on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

의 영향이 고려되어야 한다.

Mishra와 Gupta<sup>(18)</sup>는  $\lambda$ 의 영향을 고려하기 위해 특성코일직경을 도입했다. Mishra와 Gupta<sup>(18)</sup>의 특성코일직경을 도입해서 계산한 완전발달마찰계수( $f_{fd}$ )는 본 논문의 예측결과와 3%이내의 오차를 보였다.  $\lambda$ 의 증가에 따른  $f_{fd}/f_{st}$  또는 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동폭의 감소 현상은  $\lambda$ 가 증가에 따라 배관형태가 점차 직관( $\lambda=\infty$ )에 가까워지는 것으로 설명된다.

#### 4.5 레이놀즈수(Re) 영향

Fig. 11에는  $\lambda$ 와  $\delta$ 가 일정한 경우의  $f_m/f_{st}$ 의 발달 과정에 대한  $Re$ 의 영향을 나타내었다.  $Re$ 가 감소하면서 나타나는 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동거동은  $\delta$ 가 감소하는 경우와  $\lambda$ 가 증가하는 경우가 유사하다.  $Re$ 가 감소함에 따라,  $f_{fd}/f_{st}$ 와  $f_m/f_{st}$ 의 변동폭이 감소하며 이에 따라 변동횟수도 감소한다.  $Re=2000$ 에서는  $\phi_{ref} < 290^\circ$ 에서 천이과정을 포함해  $f_m/f_{st}$ 의 감쇠변동이 4회 나타나,  $Re=250$ 에서는 2차 변동도 거의 소멸된다.  $Re=125$ 에서는 한 개의 변동만 나타나고 이 변동도 매우 미세하다.  $Re=62.5$ 에서는 변동이 발생지 않고  $f_m$ 과  $f_{st}$ 의 차이도 1% 미만으로 직관의 마찰계수와 큰 차이를 보이지 않는다. 이와 같이  $Re$ 가 감소함에 따라  $f_m$ 과  $f_{st}$ 의 차이가 감소하는 이유는  $Re$ 가 감소함에 따라 유속이 감소하고 이로 인해 원심력이 크게 감소하기 때문이다.

Lin 등<sup>(14)</sup>은  $Re$ 가 감소하는 경우 주유동 흐름방향으로

로의 거리에 따른  $f_m$ 가 증가하고,  $f_m$ 의 변동폭 또한 증가하는 것으로 예측했다.  $Re$ 가 감소하면서  $f_m$ 이 증가하는 현상(단  $f_m/f_{st}$ 는 감소)에 대해서는 본 논문과 Lin 등<sup>(14)</sup>의 예측결과가 일치하나,  $f_m$ (또는  $f_m/f_{st}$ )의 변동폭에 대한 예측결과는 반대로 나타난다. Fig. 11에서  $Re$ 가 더욱 작아짐에 따라 변동이 소멸되고 직관 유동에 근접해 가는 것으로 판단해, Lin 등<sup>(14)</sup>의 예측에는 본 논문과의 경계조건 차이 이외에도 해석방법 및 격자에 따른 오차가 포함되어 있는 것으로 보인다.

$Re$ 는 나선관의 발달과정의 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$ 의 변동주기에는 크게 영향을 미치지 않는다고 보인다. 첫 번째 최대  $f_m/f_{st}$ 가 나타나는  $\phi_{ref}$ 는  $Re=2000$ 에서  $28^\circ$ ,  $Re=1000$ 에서  $30^\circ$ ,  $Re=125$ 에서  $46^\circ$ 로  $Re$ 의 감소에 따라 이차지수함수 형태로 증가하고, 이에 따라 2차 변동주기는 다소 증가하는 경향을 보였다. 그러나 3차, 4차 변동이 나타나는 경우, 3차, 4차 변동 주기는 1차 변동과 같이 일정한 패턴으로 증가하지 않으며 그 차이도 크지 않다. 이에 따라 본 논문에서 사용한  $\phi_{ref}$ 에는  $\delta$ 의 영향만 반영하고  $\lambda$ 와  $Re$ 의 영향은 반영하지 않았다.

#### 5. 결 론

나선관의 층류유동의 발달과정에 대한 완전타원형 지배방정식을 유한체적법(FVM)을 이용한 3차원 수치 해석이 수행되었다. 완전발달 유동에 대한 예측결과는 실험상관식과 최대 약 3% 미만의 오차를 보였다.

직관으로부터 나선관으로 유입되는 유동은 직관과 곡관의 교점 이전부터 내벽 쪽으로 편향되며, 내벽 쪽으로 편향되는 정도는 곡률 또는 레이놀즈수가 증가하고, 피치가 감소하는 경우 커진다. 나선관 입구근처에서 유동이 나선관의 하류로 진행됨에 따라, 극부마찰계수의 최대점의 위치가 내벽, 상하벽, 외벽 쪽의 순으로 변한다.

레이놀즈수, 피치나 곡률 등의 형상변화에 따른 평균마찰계수의 발달과정이 비교적 규칙적으로 변동하는 것으로 나타났다. 주유동 흐름방향으로의 거리에 따른 마찰계수의 변동주기는 곡률의 영향을 가장 크게 받으며, 레이놀즈수, 피치의 영향은 매우 작게 받는다.

주유동 방향으로의 거리에 따른 유동의 발달과정은 특성각  $\phi_c (= \phi/\sqrt{\delta})$  또는 참조각  $\phi_{ref} (= \phi\sqrt{\delta_{ref}/\delta})$ , 특성 길이 대 직경비  $s_c (= l\sqrt{\delta} \cos(\text{atan}\lambda)/d)$  또는 참조길



이  $l_{ref} (= l\sqrt{\delta/\delta_{ref}} \cos(\text{atan}\lambda)/\cos(\text{atan}\lambda_{ref})d_{ref}/d)$ 를 사용하여 나타낼 수 있다.

이들을 사용해 나타낸 주유동 방향으로의 거리에 따른  $f_m/f_{st}$  변동의 주기적 특성은 피치가 증가하는 경우, 레이놀즈수가 감소하는 경우와 곡률이 감소하는 경우 모두 유사한 경향을 보인다. 피치가 증가하고, 레이놀즈수가 감소하고, 곡률이 감소하는 경우  $f_{fd}/f_{st}$ 의 크기와  $f_m/f_{st}$ 의 변동폭은 감소하고 이에 따라 변동횟수도 점차 감소하나, 변동주기는 크게 변하지 않는다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

## 참고문헌

- (1) Dean, W. R., 1927, "Note on the motion of fluid in a curved pipe," *Philos. Mag.*, Vol. 20, pp. 208~223.
- (2) Dean, W. R., 1928, "The stream-line motion of fluid in a curved pipe," *Philos. Mag.*, Vol. 30, pp. 673~685.
- (3) Berger, S. A., Talbot, L. and Yao, L. S., 1983, "Flow in curved pipes," *Ann. Rev. Fluids Mech.*, Vol. 15, pp. 461~512.
- (4) Ito, H., 1987, "Flow in curved pipes," *JSME Int. J.*, Vol. 30, pp. 543~552.
- (5) Naphon, P. and Wongwises, S., 2006, "A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 463~490
- (6) Yao L. S. and Berger S. A., 1975, "Entry flow in a curved pipe," *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, pp. 177~196.
- (7) Austin, L. R., 1971, "The development of viscous flow within helical coils," Ph.D thesis, Univ. Utah, Salt Lake City, UT.
- (8) Dravid, A. N., Smith, K. A., Merrill, E. W. and Brian, P. L. T., 1971, "Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes," *AIChE J.*, Vol. 17, pp. 1114~1122.
- (9) Austin, L. R. and Seader, J. D., 1974, "Entry region for steady viscous flow in coiled circular pipes," *AIChE J.*, Vol. 20, pp. 820~822.
- (10) Olson, D. E. and Snyder, B., 1985, "The upstream scale of flow development in curved circular pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 150, pp. 139~158
- (11) Patankar, S. V., Pratap, V. S. and Sparding, D. B., 1974, "Prediction of laminar flow and heat transfer in helically coiled pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol. 62, pp. 539~551.
- (12) Liu, S. and Masliyah, J. H., 1994, "Developing Convective Heat Transfer in Helical Pipes with Finite Pitch," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 15, pp. 66~74
- (13) Soh, W. Y. and Berger, S. A., 1984, "Laminar entrance flow in a curved pipe," *J. Fluid Mech.*, Vol. 148, pp. 109~135.
- (14) Lin, C. X., Zhang, P., and Ebadian, M. A., 1997, "Laminar forced convection in the entrance region of helical pipes," *Int. J. Heat Mass Trans.* Vol. 40, pp. 3293~3304.
- (15) "Fluent 6.3 user's guide," 2006. Fluent Inc.
- (16) White, C. M., 1929, "Streamline flow through curved pipes," *Proc. R. Soc. London. Series A*, Vol. 123, pp. 645~663.
- (17) Hasson, D., 1955. "Streamline flow resistance in coils," *Res. Corresp.*, Vol. 8, pp. S1.
- (18) Mishra, P. and Gupta, S. N., 1979, "Momentum Transfer in Curved Pipes: 1. Newtonian Fluids," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 18, pp. 130~137.