

균일입구유속 조건의 나선관 입구영역의 층류 유동

김 영 인,¹ 박 종 호^{*2}

LAMINAR FLOW IN THE ENTRANCE REGION OF HELICAL TUBES FOR UNIFORM INLET VELOCITY CONDITIONS

Y.I. Kim¹ and J.H. Park^{*2}

A numerical study for laminar flow in the entrance region of helical tubes for uniform inlet velocity conditions is carried out by means of the finite volume method to investigate the effects of Reynolds number, pitch and curvature ratio on the flow development. 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 125 ~ 2000. It has been found that the curvature ratio does significantly effect on the angle of flow development, but the pitch and Reynolds number do not. The characteristic angle $\phi_c (= \phi / \sqrt{\delta})$, or the non-dimensional length $\bar{l} (= l \sqrt{\delta} \cos(\alpha \tan \lambda) / d)$ can be used to represent the flow development for uniform inlet velocity conditions. In uniform inlet velocity conditions, the growth of boundary layer delays the flow development attributed to centrifugal force, and in which conditions the amplitude of flow oscillations is smaller than that in parabolic inlet velocity conditions. If the pitch increases or if the curvature ratio or Reynolds number decreases, the minimum friction factor and the fully developed average friction factor normalized with the friction factor of a straight tube and the flow oscillations decrease.

Key Words : 나선관(Helical tube), 층류(Laminar), 발달유동(Developing flow), Fluent, 균일입구유속(Uniform Inlet Velocity), 특성각(Characteristic Angle)

1. 서 론

원형나선관은 열교환기, 혼합기뿐만 아니라 각종 배관 등 다양한 산업분야에서 이용되고 있다. 원형나선관 내부에서는 단면상의 위치와 유속 차로 인해 원심력의 차가 생겨 단면 상하에는 회전하는 이차유동이 형성된다. 이 이차유동으로 인해 나선관 내부에서는 열전달과 혼합성능이 향상되는 반면, 유로저항은 증가된다.

나선관 내부 열유동에 대한 광범위한 검토가 Berger 등[1], Ito[2] 등에 의해 수행되었다. Dean은 곡률이 작고 피치가 없는 토러스 형태의 원형곡관 내부의 완전발달유동에 대해 이론적으로 연구하고, 완전발달유동 특성이 무차원수 Dean

number $De (= Re \sqrt{\delta})$ 에 의존한다는 것을 보고했다[3]. 여기서 Re 는 레이놀즈수, $\delta (= a/R)$ 는 곡률, a 는 배관의 반경, R 은 나선관이 감긴 코일 반경을 나타낸다. Yao와 Berger[3]는 곡관 입구에 균일유속을 적용한 경우에 대해 De 이 클 때 입구 발달길이가 직관에 비해 \sqrt{De} 의 비율로 짧아지는 것을 해석적으로 보였다. Dravid 등[4]은 해석적으로 구한 완전발달 곡관 유동을 적용하고 에너지방정식에 대해 유한차분법(FDM) 적용해 열적 발달과정을 해석하고 실험과 비교했다. Austin과 Seader[5]는 피치가 작은 나선관 입구에 포물선형(parabolic) 유속이 유입되는 경우의 유속의 발달과정을 실험을 통해 분석했다. Patankar 등[6]은 피치가 작은 나선관에서 입구에 포물선형 유속과 일정온도 조건을 적용해 열유동의 발달과정에 대해 유한차분법을 사용해 해석했다. Liu와 Masliyah[7]는 피치가 큰 나선관에서 열유동의 동시 발달과정에 대해 유한차분법을 사용해 해석했다. Lin 등[8]은 피치가 큰 나선관에서 열유동이 동시에 발달하는 경우에 대해 제어체적유한요소법(CVFEM)을 사용해 해석했다. 발달과정의 Nu 또는 마찰계수

접수일: 2007년 9월 21일, 심사완료일: 2008년 3월 7일.

1 정회원, 한국원자력연구원

2 충남대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: jhpark@cnu.ac.kr

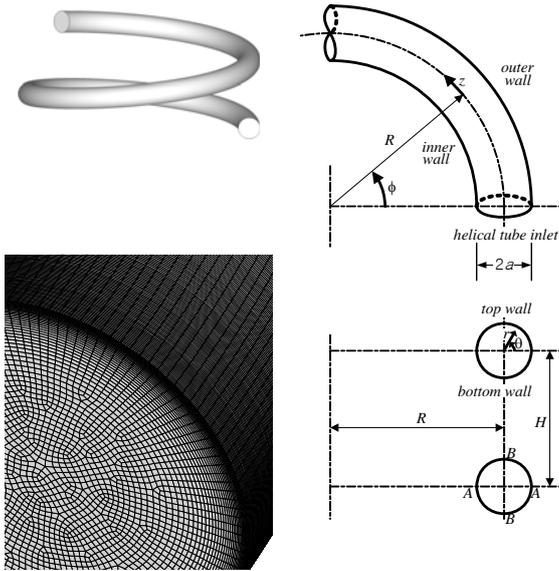


Fig. 1 Geometry, coordinate system and grid.

의 주유동 방향의 거리에 따른 공간적 변동은 Dravid 등[4], Patankar 등[6], Lin 등[8] 등의 연구에서 나타난다. Lin 등[8]의 연구를 포함해 이들 대부분의 연구에서는 열유동의 발달과정의 규칙성을 제시하지 못하고 있다.

본 논문은 균일유속 입구경계조건에서 나선관 입구로부터 완전발달영역까지 층류 유동의 발달과정의 특성을 수치해석을 통해 규명하기 위한 것이다. 이러한 발달과정의 특성은 인체의 혈관, 나선관의 입구와 배관의 곡관부에 대한 각종 열수력 변수의 정확한 예측을 위해 활용될 수 있다. 해석범위는 곡률 1/10~1/320, 피치 0.0~3.2, 레이놀즈수 125~2000 범위이다.

2. 수치해석 방법

나선관의 형상, 좌표계 및 격자를 Fig. 1에 도시하였다. 나선관의 반경은 a , 직경은 d , 나선관이 감긴 코일의 반경은 R , 코일의 피치(회전 간극)는 H 이다. 유동은 정상상태 비압축성으로 가정한다. 나선관 내부의 층류유동을 지배하는 지배방정식을 텐서(tensor) 형태로 나타내면 다음과 같다.

연속방정식

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

운동량방정식

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

입구에는 균일유속이 적용되며, 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. 벽면에는 non-slip 경계조건이 사용된다. 배관의 길이는 본 논문에서 계산된 모든 경우에 대해 유동이 충분히 발달될 수 있도록 계산 후 길이를 재수정하는 형태로 결정된다.

결과를 나타내기 위해 다음과 같은 변수가 사용된다.

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

$$f_\theta = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho u_0^2}, \quad f_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_\theta d\theta, \quad (3)$$

$$De' = Re \sqrt{a/R'}, \quad R' = R[1 + \lambda^2]$$

여기서 ρ 는 밀도, u_0 는 입구유속, $d_h (= 2a = d)$ 는 수력직경, μ 는 점성계수, δ 는 곡률, λ 는 무차원 피치, f_θ 는 원주방향 국부 마찰계수, τ_w 는 벽면의 전단응력, f_m 은 원주방향 평균 마찰계수, De' 은 수정 Dean number[9]를 나타낸다. 또한 본 논문에서는 유동의 발달과정을 나타내기 위해 축방향(z) 길이(l) 및 각도(ϕ)에 대해 다음과 같이 새로 도입한 변수를 사용한다.

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

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

여기서 ϕ_c 는 나선관의 특성각, ϕ_{ref} 는 나선관의 참조각, \bar{l} 는 나선관의 무차원 길이, l_{ref} 는 나선관의 참조길이를 나타낸다. 첨자 ref 는 $\delta=1/40$ 인 경우를 나타낸다.

지배방정식을 이산화하기 위해 Fig. 1과 같은 비정렬 비균일 격자가 사용된다. 지배방정식을 해석하기 위해 유한체적법(FVM)을 이용한 상용 FLUENT 6.3[10]이 사용된다. 대류항에 대해서는 이차상류차분법(2nd-order upwind scheme)이 사용된다. 속도와 압력을 연계해석하기 위해 SIMPLE 알고리즘이 사용된다. N 번째 계산에서 모든 변수(Φ)에 대한 모든 격자점에서 잔차(residual) R_N^Φ 이 $R_N^\Phi / R_m^\Phi < 10^{-10}$ (R_m^Φ 은 m 번째 계

산에서의 최대 잔차)의 조건을 만족하는 것이 수렴기준으로 사용된다.

본 논문에서는 균일유속 경계조건을 나선관 입구에 적용하고 입구로부터 유동이 완전히 발달될 때까지 유동이 발달해 가는 과정을 모사한다.

3. 격자 및 검증계산

균일유속의 입구경계조건으로부터 발달하는 유동은 입구로부터 유동경계층이 성장하기 시작하므로 경계층의 성장과정을 정확히 모사하기 위해서는 다소 많은 벽면(r) 및 축방향(z) 격자가 필요하다(Fig. 1). 축방향에 수직한 단면격자는 단면을 5개로 나누어 구성한다. 바깥의 4개 단면에는 벽면근처의 격자가 조밀한 방사형격자가, 중앙의 1개 단면에는 비정형 사각 격자가 사용된다. 축방향 격자는 입구근처에서는 조밀하게, 약 $10^\circ(\phi_{ref})$ 부터는 등간격으로 구성한다. 격자는 프리즘 형태의 육면체격자가 사용된다.

해석범위 내에서 유동변화가 가장 큰 $Re=2000$, $\lambda=0.1$, $\delta=1/10$ 조건에서, 350, 525, 535, 630, 700, 715, 825개의 축방향 격자에 대해, 1992, 2851, 3693, 4893, 6293, 8670개의 단면방향 격자에 대한 격자민감도를 조사해, 평균마찰계수의 오차는 0.5% 이하, $\phi_{ref}=20^\circ$ 간격으로 조사한 단면평균 국부압력치의 오차는 2% 이하가 되도록 격자를 선정했다. Table 1에는 선정 격자 4893x(715)와 참조격자 8670x(825)의 주요 형상별 오차를 나타냈다.

Fig. 2에는 완전발달마찰계수에 대한 예측결과를 White[11], Mishra와 Gupta[9]의 실험상관식과 비교하였다. 예측결과는 최대편차 2.5% 이내에서 White 실험상관식과 4.0% 이내에서 Mishra와 Gupta의 실험상관식과 전 범위에서 유사하다. 최대 편차는 마찰계수가 직관의 마찰계수와 유사한 $10 < De < 60$ 에서 나타나며, 이 밖의 영역에서는 두 가지 실험상관식 모두 2% 이하의 편차를 보인다.

Table 1 Grid sensitivity.

λ	δ	Grid sectionalx(axial)	Pressure max. error [%]	f_m max. error [%]
0.1	1/10	4893x(715)	1.3	0.3
0.1	1/40	4893x(715)	1.2	0.2
0.1	1/320	4893x(715)	1.6	0.1
3.2	1/40	4893x(715)	1.7	0.1
8670x(825) : reference grid				

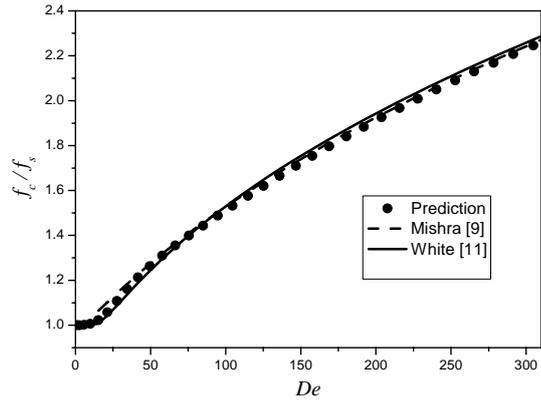


Fig. 2 Comparison of fully developed friction factor f with experimental correlations. f_c , curved tube values; f_s , straight tube values.

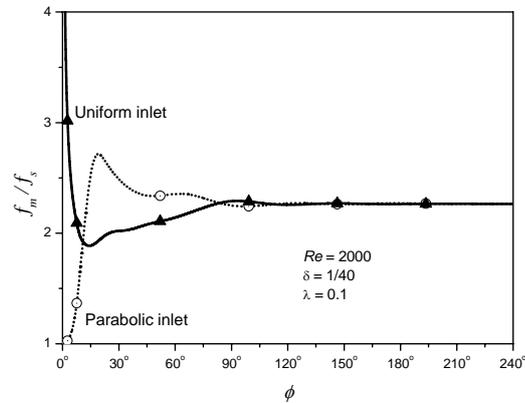


Fig. 3 Effects of inlet condition on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

4. 해석결과

4.1 발달과정

Fig. 3에는 나선관 입구에 직관의 완전발달유속(포물선형)이 적용된 경우와 균일유속이 적용된 경우의 평균마찰계수 f_m 을 직관의 마찰계수 f_s 로 정규화한 f_m/f_s 의 발달과정을 각도(ϕ) 따라 나타내었다. 포물선형입구유속의 유동발달과정에는 포물선형직관의 유동경계층이 나선관의 유동경계층으로 천이되면서 마찰계수가 증가하는 현상이 나타난다. 그러나 균일입구유속의 유동발달과정에는 유동경계층의 성장현상(경계층 증가)과 원심력에 의한 나선관 유동경계층으로의 천이현상(외벽과 상하벽의 경계층 감소)이 상호 상충되어 나타난다. 발달과정의 초기에는 경계층 성장현상이 우세해 마찰계수가

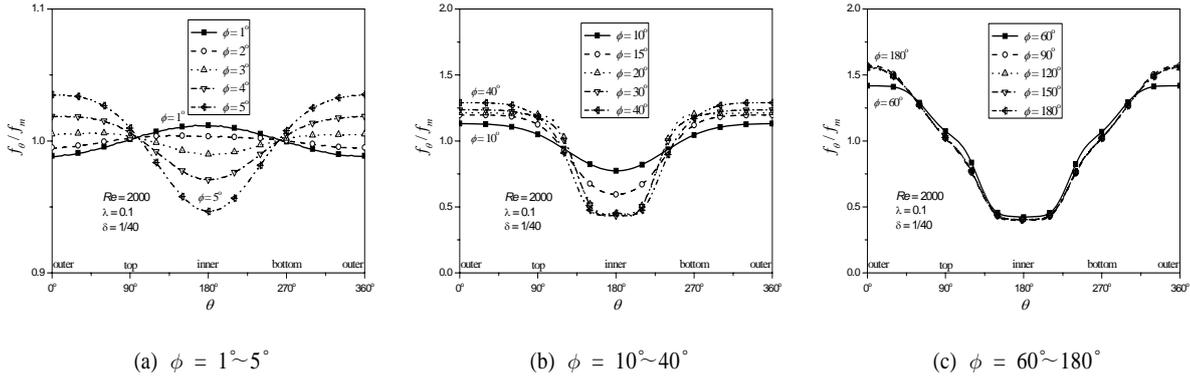


Fig. 4 Development of local friction factor.



Fig. 5 Development of axial velocity at $Re=2000$, $\lambda=0.1$, $\delta=1/40$.

감소하고, 이후 원심력이 우세해지면서 마찰계수가 다시 증가한다. 또한 유동경계층 성장구간이 추가됨에 따라 나선관의 유동경계층으로의 천이가 지연되며, 마찰계수의 변동이 감소한다. 단 여기서는 나선관의 유동경계층을 벽면과 단면중심을

있는 중심선상의 벽면과 가장 가까운 유속 피크(내외벽 1개, 상하벽 2개)까지의 거리로 가정한다.

Fig. 4에는 곡부마찰계수 f_θ 를 f_m 으로 정규화한 f_θ/f_m 의 발달과정을 나타내었다. Fig. 5에는 Fig. 1 A-A, B-B 선상의 축

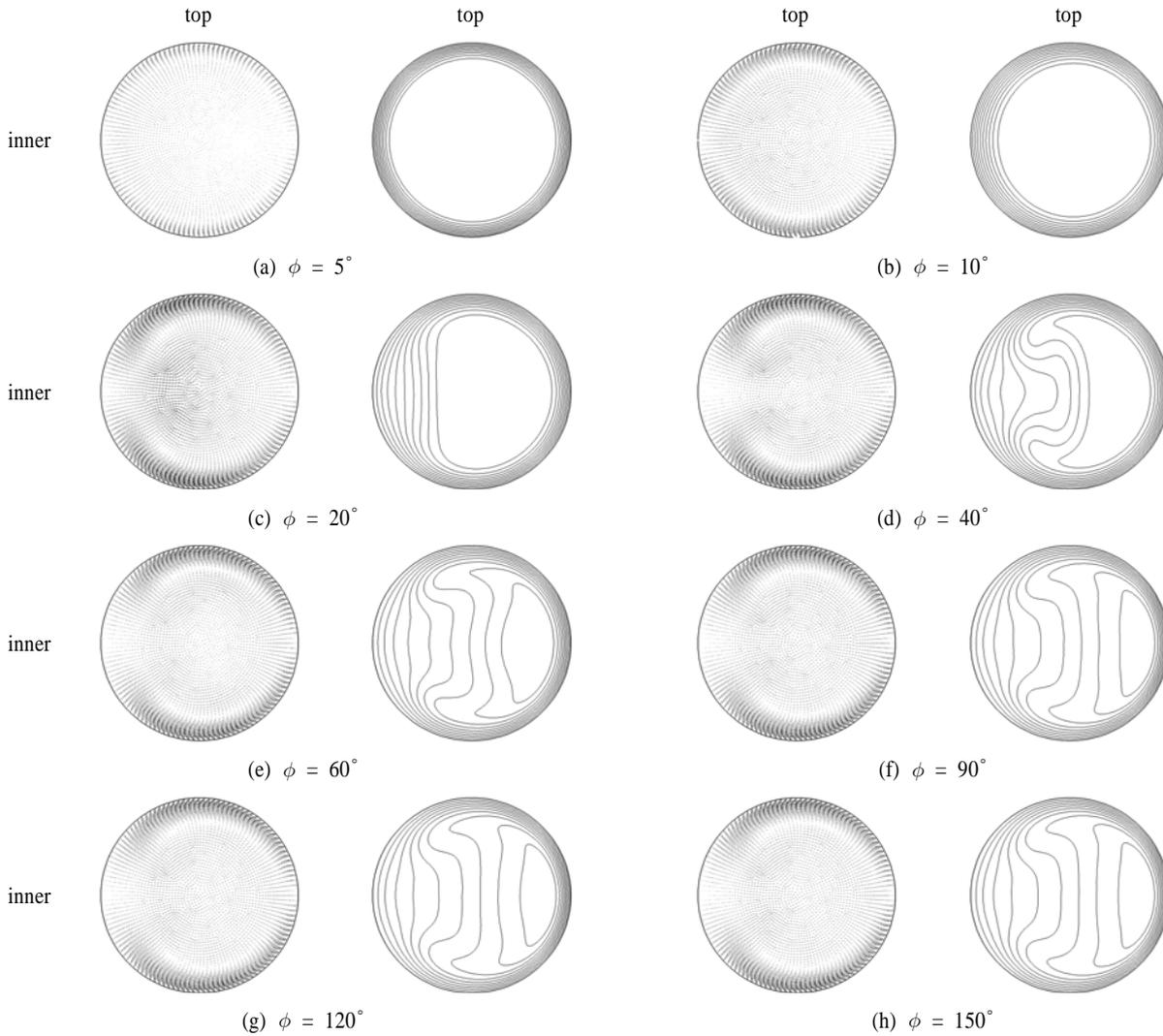


Fig. 6 Development of velocity vector(left) and axial flow distribution(right) at $Re=2000$, $\lambda=0.1$, $\delta=1/40$

방향유속 u_z 를 입구유속 u_0 로 정규화한 u_z/u_0 의 발달과정을 $5^\circ(\phi)$ 간격으로 나타냈다. Fig. 6에는 발달과정의 속도벡터 및 축방향 속도분포를 나타냈다. 속도분포는 각 단면에서의 최대 유속을 10등분한 등속선으로 나타냈다. 균일입구유속 조건에서의 유동발달과정을 다음과 같이 세 가지 단계로 나누어 설명한다.

(1) 경계층 성장(약 $\phi < 15^\circ$)

이 단계에서는 유동경계층 성장현상이 우세해 f_m/f_s 가 급격히 감소한다(Fig. 3). 직선유동이 곡관을 만날 때는 외벽의

압력이 상승해서 유동이 내벽쪽으로 치우치는 현상이 나타난다. 이 현상에 의해 Fig. 4의 1°, 2°에서는 내벽쪽의 f_θ/f_m 이 미세하게 크게 나타난다. 이후(Fig. 4의 3°) 원심력의 영향으로 유동이 외벽쪽으로 편향되면서 내벽쪽의 f_θ/f_m 보다는 외벽 및 상하벽쪽의 f_θ/f_m 이 커진다.

나선관으로 유입된 유체는 유입 직후부터 원심력의 영향을 받기 시작한다. 유속이 빠른 주유동은 원심력이 커 외벽쪽으로 향하고, 이로 인해 단면에는 중심으로부터 외벽과 상하벽과 내벽쪽을 거쳐 다시 중심으로 향하는 두 개의 이차유동이 형성된다. 약 $\phi \sim 5^\circ$ 에서는 이차유동이 매우 약해 축방향 유동

은 한쪽으로 크게 치우치지 않는다(Fig. 6). 약 $\phi \sim 10^\circ$ 에서는 다소 빠른 이차유동이 벽면 근처에 형성되고, 축방향 유속은 타원형 분포를 나타내며 외벽쪽으로 치우친다(Fig. 6).

(2) 경계층 천이(약 $15^\circ < \phi < 90^\circ$)

이 단계에서는 유동경계층 성장현상 보다는 원심력의 영향이 우세해지면서 유동이 외벽쪽으로 치우치고, 이에 따라 외벽과 상하벽쪽의 유동경계층이 얇아지고 f_m/f_s 가 변동하면서 증가한다(Fig. 3-6). Fig. 6에 나타난 바와 같이 약 $\phi \sim 20^\circ$ 에서는 원심력의 영향으로 벽면 근처의 이차유동이 더욱 커지며, 내벽쪽의 축방향 유속이 크게 감소한다. 이 이차유동은 ϕ 가 증가함에 따라 증가해서 약 $\phi \sim 60^\circ$ 에서는 이차 및 축방향 유동의 전반적인 구조가 형성된다.

(3) 안정화(약 $\phi > 90^\circ$)

이 단계에서는 유동이 점차 안정화되면서, Fig. 3과 같이 약 $\phi > 90^\circ$ 에서는 f_m/f_s 의 변화가 크게 감소하며, Fig. 5,6과 같이 유동구조가 크게 변하지 않는다. 약 $\phi > 210^\circ$ 에서는 f_m/f_s 의 미세 변동도 대부분 소멸하고 유동이 완전히 발달한다(Fig. 3).

4.2 곡률(δ), 피치(λ), 레이놀즈수(Re) 영향

Fig. 7에는 Re 와 λ 가 일정한 경우의 f_m/f_s 의 발달과정에 대한 곡률 δ 의 영향을 ϕ_{ref} 에 대해 나타내었다. Fig. 8에는 Re 와 δ 가 일정한 경우의 f_m/f_s 의 발달과정에 대한 λ 의 영향을, Fig. 9에는 λ 와 δ 가 일정한 경우의 f_m/f_s 의 발달과정에 대한 Re 의 영향을 ϕ 에 대해 나타내었다.

나선관 유동에서 λ , δ 또는 Re 가 변하는 경우의 유동 발달과정의 길이 또는 각도에 대한 상관관계는 잘 알려져 있지 않아 일반적으로 각도 ϕ 또는 무차원 길이 l/d 를 사용해 발달과정을 나타내고 있다.

Fig. 7-9에서 Re 가 변하는 경우는 형상이 일정하나 λ 나 δ 가 변하는 경우에는 형상변화가 매우 크다. λ 나 Re 가 변하는 경우에는 두 경우의 길이차가 크나, Fig. 8,9와 같이 ϕ 를 사용해 나타낸 f_m/f_s 의 발달과정의 변화는 두 경우가 유사하다. δ 가 변하는 경우에 일반적인 방법으로 ϕ 또는 l/d 를 사용해 나타내는 경우에는 f_m/f_s 의 발달과정의 변화는 λ 나 Re 가 변하는 경우와 크게 다르다. 그러나 식 (4)에 정의된 참조각 $\phi_{ref}(=\phi \sqrt{\delta_{ref}} / \sqrt{\delta})$ 를 사용하는 경우, Fig. 7와 같이 δ 에 따른 f_m/f_s 의 발달과정이 λ 나 Re 가 변하는 경우와 유사해진다. δ , λ 와 각도 및 길이의 관계는 식 (4)에 정리하였다.

Fig. 7-9에서 λ , δ , Re 의 변화에 따른 ϕ_{ref} 를 사용해 나타

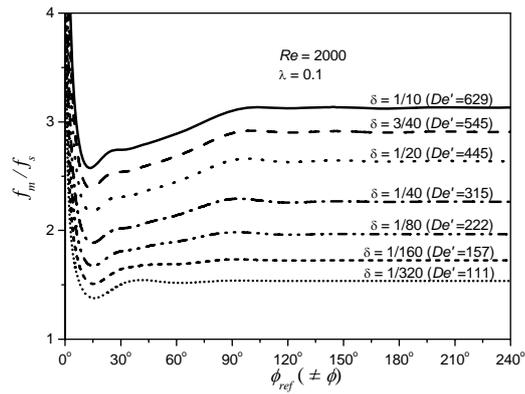


Fig. 7 Effects of curvature ratio on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

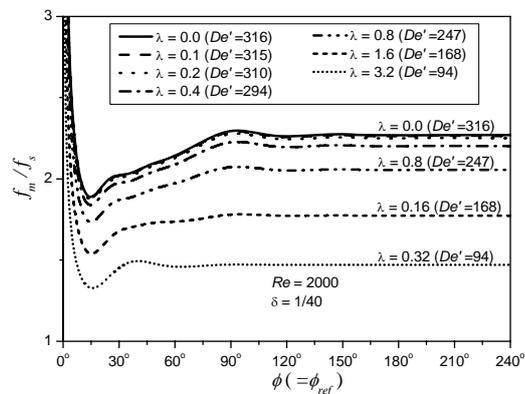


Fig. 8 Effects of pitch on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

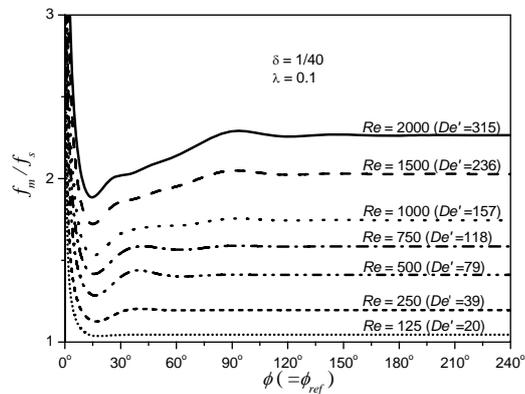


Fig. 9 Effects of Reynolds number on the development of average friction factor on the circumference of a helical tube.

낸 f_m/f_s 의 발달과정은 유사하다. Fig. 7에서 δ 가 크거나, Fig. 8에서 Re 가 크거나, Fig. 9에서 λ 가 작은 경우(De' 큰 경우)에는 원심력의 영향이 증가하면서 유동경계층 성장이 큰 f_m/f_s 에서 억제되어 최소 f_m/f_s 가 크고, 유동경계층 성장 이후에 나타나는 최대 f_m/f_s 와 f_{fd}/f_s (f_{fd} 는 완전발달 f_m)가 모두 크게 나타난다. 동일한 조건에서 δ 나 Re 가 작아지거나, λ 가 커지는 경우(De' 감소)에는 최소 f_m/f_s , 유동경계층 성장 이후의 최대 f_m/f_s 및 f_{fd}/f_s 가 모두 작게 나타난다. Lin 등[8]에서는 δ 에 따른 f_m 의 발달과정을 ϕ 를 사용해 나타냄으로써 유사성을 찾을 수 없다.

Fig. 7-9에서 δ 나 Re 가 감소하거나, λ 가 증가하는 경우(De' 감소) 최소 f_m/f_s 이 나타나는 지점은 하류로 이동하는 경향이 있으나 그 차가 크지 않다. 최소 f_m/f_s 은 $13^\circ < \phi_{ref} < 18^\circ$ 범위에서 나타난다. 또한 Fig. 7-9에서 $\delta \geq 1/160$, $\lambda \leq 0.16$, $Re \geq 750$ 일 때($De' \geq 118$)는 유동경계층 성장 이후의 최대 f_m/f_s 는 두 번째 피크(약 $\phi_{ref} \sim 95^\circ$) 위치에서 나타난다. 그러나 δ 나 Re 가 감소하거나 λ 가 증가(De' 감소)하면 f_{fd}/f_s 가 감소하고 두 번째 피크가 약해져서, $\delta=1/320$, $\lambda=3.2$, $Re \leq 500$ 일 때($De' \leq 111$)는 최대 f_m/f_s 는 첫 번째 피크(약 $\phi_{ref} \sim 40^\circ$) 위치에서 나타난다.

Fig. 7-9에서 δ 나 Re 가 감소하거나 λ 가 증가하는 경우(De' 감소) 최소 f_m/f_s 가 작아지고, f_{fd}/f_s 가 감소하고, f_m/f_s 의 변동이 소멸되는 것은, δ 가 감소하거나 λ 가 증가하면 배관 형태가 나선관에서 직관 형태($\delta=0$, $\lambda=\infty$)로 변해서 원심력이 약해지고, Re 가 감소하면 Re 에 비해 원심력의 영향이 감소해 직관유동과 유사해 지는 것으로 설명된다.

5. 결 론

균일한 입구유속으로 나선관 내부로 유입되는 층류 유동의 발달과정에 대해 유한체적법을 이용한 수치해석이 수행됐다.

균일입구유속의 경우, 나선관의 입구근처에서는 직선유동이 나선관을 만날 때 외벽의 압력이 상승해서 유동이 내벽쪽으로 치우치는 현상, 유동경계층이 성장하는 현상, 원심력에 의해 유동이 외벽으로 치우치는 현상이 복합되어 나타난다.

균일입구유속의 경우에 유동이 내벽쪽으로 치우치는 현상은 입구 근처에 국한되어 나타난다. 균일입구유속의 경우는 유동경계층의 성장 영향으로 원심력에 의해 외벽과 상하벽쪽의 유동경계층이 얇아지는 현상이 완전발달입구유속의 경우보다 지연되어 나타나고, 마찰계수의 변동도 감소한다.

균일입구유속의 경우, f_m/f_s 의 발달과정은 식 (4)에 정의된 특성과 또는 참조각, 무차원길이 또는 참조길이를 이용해 나타낼 수 있다. 이들을 이용해 나타낸 f_m/f_s 의 발달과정은 피치가 증가하는 경우, 레이놀즈수가 감소하는 경우와 곡률이 감소하는 경우(De' 감소) 모두 유사한 경향을 보인다. 이 경우 최소 f_m/f_s , f_{fd}/f_s 와 f_m/f_s 의 변동이 모두 감소한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- [1] 1983, Berger, S.A. et al., "Flow in curved pipes," *Ann. Rev. Fluids Mech.*, Vol.15, pp.461-512.
- [2] 1987, Ito, H., "Flow in curved pipes," *JSME Int. J.*, Vol.30, pp.543-552.
- [3] 1975, Yao, L.S. and Berger, S.A., "Entry flow in a curved pipe," *J. Fluid Mech.*, Vol.67, pp.177-196.
- [4] 1971, Dravid, A.N. et al., "Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes," *AIChE. J.*, Vol.17, pp.1114-1122.
- [5] 1974, Austin, L.R. and Seader, J.D., "Entry region for steady viscous flow in coiled circular pipes," *AIChE. J.*, Vol.20, pp.820-822.
- [6] 1974, Patankar, S.V. et al., "Prediction of laminar flow and heat transfer in helically coiled pipes," *J. Fluid Mech.*, Vol.62, pp.539-551.
- [7] 1994, Liu, S. and Masliyah, J.H., "Developing Convective Heat Transfer in Helical Pipes with Finite Pitch," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.15, pp.66-74.
- [8] 1997, Lin, C.X. et al., "Laminar forced convection in the entrance region of helical pipes," *Int. J. Heat Mass Trans.* Vol.40, pp.3293-3304.
- [9] 1979, Mishra, P. and Gupta, S.N., "Momentum Transfer in Curved Pipes: 1. Newtonian Fluids," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol.18, pp.130-137.
- [10] 2006, "Fluent 6.3 user's guide," Fluent Inc.
- [11] 1929, White, C.M., "Streamline flow through curved pipes," *Proc. R. Soc. London. Series A*, Vol.123, pp.645-663.