

# 헬리컬 코일 튜브에서의 층류, 천이, 난류 영역의 마찰계수에 대한 실험적 연구

박원기 · 김태훈 · 도규형 · 한용식\* · 최병일\*\*

과학기술연합대학원대학교 플랜트기계공학과 · \*한국기계연구원 에너지플랜트안전연구실  
(2017. 12. 5. 접수 / 2017. 12. 15. 수정 / 2017. 12. 21. 채택)

## Experimental Study of Friction Factors for Laminar, Transition, and Turbulent Flow Regimes in Helical Coil Tubes

Won Ki Park · Taehoon Kim · Kyu Hyung Do · Yong-Shik Han\* · Byung-Il Choi\*\*

Department of Plant System and Machinery, University of Science and Technology

\*Department of Plant Safety Technology, Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM)

(Received December 5, 2017 / Revised December 15, 2017 / Accepted December 21, 2017)

**Abstract :** The friction factors according to the flow regimes in helical coil tubes depend on the coil diameter, the tube diameter, and the coil pitch. In previous studies, correlations for the laminar flow regime in helical coil tubes have been proposed. However, studies on the transition flow regime and the turbulent flow regime are insufficient and further researches are necessary. In this study, characteristics of the friction factors for the laminar, transition and turbulent flow regimes in helical coil tubes were experimentally investigated. The helical coil tubes used in the experiments were made of copper. The curvature ratios of the helical coil tubes, which means the ratio of helical coil diameter to inner diameter of the helical coil tube are 24.5 and 90.9. Experiments were carried out in the range of  $529 \leq Re \leq 39,406$  to observe the flows from the laminar to the turbulent regime. The friction factors were obtained by measuring the differential pressures according to the flow rates in the helical coil tubes while varying the curvature ratios of the helical coil tubes. Experimental data show that the friction factors for the helical coil tube with 24.5 in the curvature ratio of the helical coil tube were larger than those in the straight tube in all flow regimes. As the curvature ratio of the helical coil tube increases, the friction factor in turbulent flow regime tends to be equal to that of the straight tube. In addition, it was confirmed that the transition flow regimes in the helical coil tubes were much wider than those in the straight tube, also the critical Reynolds numbers were larger than those in the straight tube. The results obtained in this experimental study can be used as basic data for studies on the water hammer phenomenon in helical coil tubes.

**Key Words :** friction factor, helical coil tube, dean number, critical Reynolds number

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경

대부분의 산업현장에서 효율적인 공간 활용을 위해 곡선으로 휘어지거나 각진 튜브가 많이 사용된다. 또한, 정유, 담수화, 해양 플랜트 등의 산업현장에서 복잡한 튜브라인들을 쉽게 접할 수 있다.

이러한 튜브라인들에서 시스템의 이상으로 인해 튜브라인의 밸브가 빠르게 닫히는 경우 순간적으로 튜브 내의 유속이 정지하고 압력이 크게 상승 또는 하강하면

서 압력파(Pressure wave)가 배관의 사이를 왕복하는 수격현상(Water hammer)이 나타난다. 이로써 튜브라인의 형상(Tubeline profile)에 따라 튜브 내의 압력이 물의 포화증기압 이하로 떨어지면 증기공동(Vapor cavity)이 발생하여 수주분리(Column separation) 현상이 발생하고, 튜브 내의 압력이 대기압보다 낮아지면 튜브의 좌굴(Collapse)이 일어날 수도 있다. 또한, 이러한 압력 변화로 인해 튜브 내에 진동이 유발되어 소음이 발생하기도 하고 심한 경우에는 튜브는 물론 펌프, 밸브 등의 시설물이 파손될 수도 있다<sup>1,2)</sup>.

\* Corresponding Author : Byung-Il Choi, Tel : +82-42-868-7405, E-mail : cbisey@kimm.re.kr

Department of Plant Safety Technology, Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, Korea

이러한 수격현상은 플랜트 산업현장에서 많이 사용되는 헬리컬 코일 튜브에서도 발생할 수 있으며, 특히, 고온·고압에서 운전되는 경우에 수격현상은 더욱 심각하게 작용하여 안전문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 헬리컬 코일 튜브를 활용하는 시스템의 중요 설계 요소인 헬리컬 코일 튜브에서의 유동 영역에 따른 마찰계수를 분석하고, 그 결과를 향후 헬리컬 코일 튜브에서의 수격현상에 대한 연구에 활용하고자 한다.

## 1.2 연구 동향

Ghobadi와 Muzychka<sup>3)</sup>는 기존의 연구들을 바탕으로 여러 종류의 곡선 튜브에서의 임계 레이놀즈수를 구하는 상관식과 층류 영역에서 마찰계수를 구하는 상관식들을 정리하였고, 형상에 따른 튜브 내의 속도분포와 온도에 대한 영향을 정리하였다.

Cioncolini와 Santini<sup>4)</sup>는 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수를 관찰하고, 코일 비틀림 파라미터를 이용하여 헬리컬 코일 피치가 코일 지름보다 작을 경우 비틀림의 영향을 무시할 수 있음을 시사했다. 하지만, 그들은 실제로 헬리컬 코일 피치가 코일 지름보다 큰 경우에 대해서는 실험하지 않았다.

Nobari와 Malvandi<sup>5)</sup>는 수치해석 기법을 이용해 고리 모양의 헬리컬 튜브에서의 비압축 점성 흐름에 대한 비틀림과 곡률 효과(Curvature effects)에 대한 연구를 진행하였다. 비틀림의 크기에 따른 원심력, 축 속도 및 곡률 효과에 대한 양상을 설명하고, 비틀림이 커질수록 헬리컬 코일 튜브에서의 원심력이 감소하여 마찰계수가 감소함을 밝혀냈다.

Ju et al.<sup>6)</sup>은  $d=18$  mm이고  $D=112$  mm ( $d$ 는 튜브의 지름,  $D$ 는 코일의 지름)인 열교환기(HTR-10)의 증기발생기를 통해 실험적인 방법으로 유동 특성을 연구하였다. 실험 결과 헬리컬 코일 튜브의 임계 레이놀즈수가 10,000으로 직선 튜브에 비해 훨씬 크다는 것을 알아냈고, 그것이 딘(Dean)수의 함수임을 확인했다.

Manlapaz와 Churchill<sup>7)</sup>은 헬리컬 코일 튜브에서 층류 영역의 모든 변수( $D/d$  및  $2p/D$ )( $p$ 는 코일 피치)를 적용하여 마찰계수 상관식을 만들었다.  $d/D$ 는 0.1과 0.2로 실험을 했고, 그 때  $2p/D$ 와 유속  $V$ 를 다르게 하면서  $0.999 \leq Re \leq 1,295$  ( $0.316 \leq De \leq 410$ )인 범위에서 연구가 진행되었다. 또한, 그들은 딘수 대신 헬리컬코일수를 대입해 코일 피치에 대한 효과를 변수로 넣어 코일 피치가 헬리컬 코일 반지름보다 작은 경우 코일 피치는 중요한 변수가 아님을 확인하였다. 본 실험 또한

헬리컬 코일 피치가 헬리컬 코일 반지름보다 작은 경우에 대해 실험이 진행되었기 때문에 헬리컬 코일 피치에 의한 영향은 고려하지 않았다.

Ghobadi와 Muzychka<sup>3)</sup>에 따르면 Adler<sup>8)</sup>는 곡선 튜브에 대한 마찰계수 상관식을 제시하였고, 그것을 서술하기 위해 적분 경계층 이론(Integral boundary layer theory)을 사용하였다. 그는  $300 \leq Re \leq 11,770$ 의 범위에서  $D/d$ 의 값이 50, 100 그리고 200일 때의 유동을 해석하였으며, 각 형상에서의 임계 레이놀즈수는 각각 5,620, 4,730 그리고 3,980이었다.

Van Dyke<sup>9)</sup>는 층류 영역의 마찰계수 상관식을 얻기 위해 수치해석적인 방법을 이용했다. 그는 곡률비가 1/250보다 크지 않은 경우 층류 영역에서 이론적인 딘수 범위의 마찰계수가 실험치와 상당히 일치한다는 것을 확인했다.

## 1.3 연구 목적

기존에 층류 영역에서 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수에 관한 연구는 많았지만, 천이 영역과 난류 영역에서 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수에 대한 연구는 미진하다. 따라서 본 연구에서는 층류, 천이 및 난류 영역을 포함하는 영역에서 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수에 대한 실험적 연구를 수행하고자 한다. 실험적으로 구한 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수 특성을 분석하고, 기존의 연구들에서 얻은 상관식들과 정량적으로 비교하고자 한다.

## 2. 배경 지식

### 2.1 레이놀즈수와 딘수

딘수는 곡선 튜브에서 다루어지는 무차원수이고, 이 값에 따라 마찰계수를 나타낼 수 있다. 식 (1)과 식 (2)는 각각 레이놀즈수( $Re$ )와 딘수( $De$ )를 나타낸다.

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (1)$$

$$De = Re \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V$ 는 평균 유속,  $\mu$ 는 유체의 점성계수,  $d$ 는 튜브의 지름 그리고  $D$ 는 헬리컬 코일의 지름을 나타낸다.

그리고 물의 밀도와 점성계수를 구하기 위해 식 (3)과 식 (4)가 사용되었다<sup>10)</sup>.

$$\rho \approx 1,000 - 0.0178|T-4|^{1.7} \quad (kg/m^3) \quad (3)$$

$$\mu \approx (1.788 \times 10^{-3}) \quad (4)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{Exp} \left( -1.704 \right. \\ \left. - \frac{5.306 \times 273}{T+273} \right) \\ \left. + \frac{7.003 \times 273^2}{(T+273)^2} \right) \quad (kg/m.s) \end{array} \right)$$

여기서,  $T$ 는 물의 섭씨온도로  $0^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$ 의 범위에서 유효하다.

## 2.2 입구 영역

실험에 앞서 헬리컬 코일 튜브에서의 입구 영역을 고려해야 한다. Ghobadi와 Muzychka<sup>3)</sup>에 따르면 헬리컬 코일 튜브의 입구 영역은 직선 튜브에 비해 20~50% 짧고, 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\phi = 49 \left( De \frac{d}{D} \right)^{0.33} \quad (5)$$

$190 \leq De \leq 950$

여기서,  $\phi$ 는 헬리컬 코일의 중심축을 기준으로 한 입구 영역 유동의 각도를 나타낸다. 대부분의 경우 입구 영역이 90~245도 사이로 나타나기 때문에 본 실험에서는 완전 발달 유동을 만들기 위해 헬리컬 코일의 1턴(Turn)을 입구 영역으로 가정하였다. 본 실험이 식 (5)에서 제시된 단수 범위 밖에서 진행되더라도 차압 센서는 코일의 첫 턴을 제외한 구간에서 사용되었고, 실험의 형상을 대입한 최대 단수가 7,954인 경우의 입구 영역을 계산한 결과가 330도로 나타났기 때문에 입구 영역을 1턴으로 설정하기에 적합한 것으로 판단된다.

## 2.3 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수

식 (6)을 통해 실험에서 측정된 압력차로부터 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수를 구할 수 있다.

$$\Delta P = \left( \frac{4f_c L}{D_h} \right) \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6)$$

$$\Rightarrow f_c = \frac{D_h \Delta P}{2L\rho V^2} = \frac{d}{2\rho V^2} \times \frac{dp}{dx}$$

여기서,  $f_c$ 는 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수,  $D_h$ 는 튜브의 수력직경,  $dp/dx$ 는 거리에 따른 압력 강하,

$L$ 은 차압을 측정한 튜브의 길이 그리고  $\Delta P$ 는 측정된 차압을 나타낸다. 이때 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수를 비교하기 위한 상관식들에 Fanning friction factor가 사용되었으므로 본 실험 또한 Fanning friction factor를 적용하였다.

## 2.4 불확도 분석

실험의 정확도를 높이기 위해 반복 실험을 진행하였고 불확도 분석을 통해 실험 결과의 오차 범위를 계산하였다. 식 (6)에  $V=Q/A(m/s)$ 를 대입하면 식 (7)을 구할 수 있다. 여기서,  $Q$ 는 유체의 유량을 나타내고,  $A$ 는 튜브의 단면적을 나타낸다. 실험 회차마다 달리 측정된 변수는  $\Delta P$ ,  $Q$ ,  $\rho$ 이다.

$$f_c = \frac{\pi^2 d^5 \Delta P}{32L\rho Q^2} \quad (7)$$

이 때의 표준 불확도는 식 (8)과 같다.<sup>11)</sup>

$$u_{f_c} = \sqrt{\left( \frac{\partial f_c}{\partial \Delta P} \right)^2 u_{\Delta P}^2 + \left( \frac{\partial f_c}{\partial Q} \right)^2 u_Q^2 + \left( \frac{\partial f_c}{\partial \rho} \right)^2 u_\rho^2} \quad (8)$$

여기서,  $u_{\Delta P} = \sqrt{s_{\Delta P}^2 + b_{\Delta P}^2}$ ,  $u_Q = \sqrt{s_Q^2 + b_Q^2}$  및  $u_\rho = \sqrt{s_\rho^2 + b_\rho^2}$ 는 각 변수의 불확도를 나타내고,  $s_{\Delta P}$ ,  $s_Q$  및  $s_\rho$ 는 각 변수들의 평균값에 대한 표준편차를 나타낸다. 그리고  $b_{\Delta P}$ ,  $b_Q$  및  $b_\rho$ 는 각 측정 센서에 대한 표준 불확도를 나타낸다.

결과적으로 전체 불확도는  $U_{f_c} = 2u_{f_c}$ 으로써 95%의 신뢰도로 계산되었고, 따라서 마찰계수와 오차 범위를 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{f}_c \pm U_{f_c} \quad (9)$$

## 3. 실험 방법

본 연구에서는 구리로 제작된 헬리컬 코일 튜브를 사용하여 물의 유량을 변화시키면서 그에 따른 압력차를 측정하고 그것을 통해 마찰계수를 계산하였다. 실험의 개략도는 Fig. 1에서 확인할 수 있고, 실제 실험 장치들의 사진은 Fig. 2에 나타나 있다. 그리고 실험에 사용된 헬리컬 코일들의 형상을 Table 1에 나타

Table 1. Geometries of the helical coil tubes used in experiments

	$D$ , (cm)	$d$ , (cm)	$p$ , (cm)	Turn	$D/d$
Case 1	27	1.1	5	10	24.5
Case 2	100	1.1	5	10	90.9

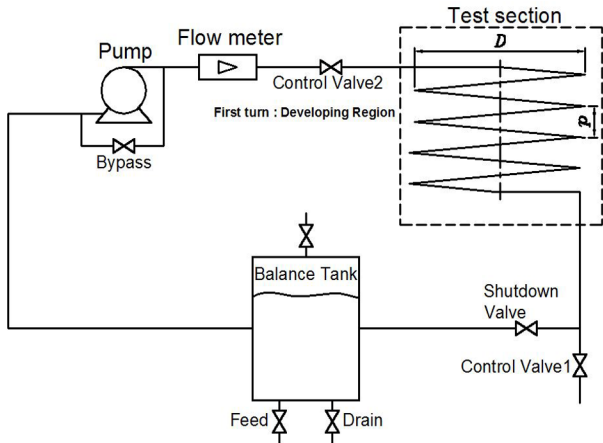


Fig. 1. Schematics of experimental apparatus.

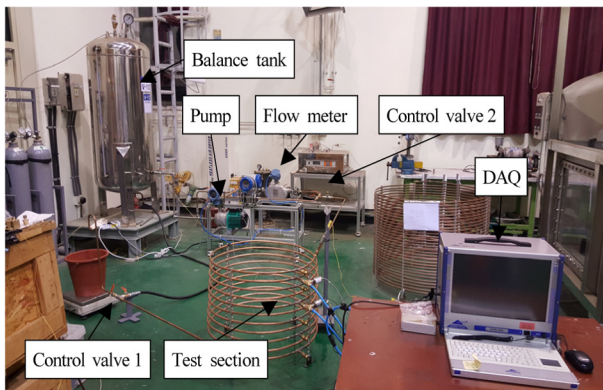


Fig. 2. Picture of experimental apparatus.

내었다. 이 때 기존 연구의 마찰계수 상관식들이 단수로 표현되었고, 단수는 헬리컬 코일의 지름과 튜브의 지름에 따라 값이 달라지므로 본 연구에서는  $D/d$ 를 헬리컬 코일 튜브의 형상을 나타내는 지표로 적용하였다. 그리고 이를 헬리컬 코일 튜브의 곡률비로 정의하였다.

실험에 사용된 펌프는 황형 다단 스테인레스 펌프로 최대 100 kg/min의 양수량을 가지며 밸런스 탱크의 물을 흡입하여 코리올리 유량계로 보낸다. 코리올리 유량계는 최대 35 kg/min의 질량 유량을 측정할 수 있고, 정확도는 전체 범위의  $\pm 0.05\%$ 이며 전향력을 이용하여 물의 질량 유량을 측정하게 된다.

테스트 영역에서는 각각 전체 범위의  $\pm 0.08\%$ 와

$\pm 0.25\%$ 의 정확도를 갖는 7 kPa과 35 kPa범위의 차압 센서를 이용하였다. 그리고 차압 센서의 측정 범위를 초과하는 난류 영역의 압력을 측정하기 위해 15, 30 그리고 100 psig까지 측정할 수 있는 게이지 압력 센서를 범위에 맞게 사용하였다. 게이지 압력 센서들의 정확도는 각각 전체 범위의  $\pm 0.25\%$ 이다.

설치된 실험 장치들이 적절히 설치된 것인지 판단하기 위해 직선 튜브를 이용해 층류 영역부터 난류 영역까지의 마찰계수를 구하고, 그것을 직선 튜브에서의 마찰계수 상관식(식 (10)-(12))과 비교하였다<sup>10,12</sup>.

$$f_{s\_lam} = \frac{16}{Re} \quad (10)$$

$$f_{s\_trans} = 2 / \left( \left( \frac{1}{\left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{10} + \left( \frac{Re}{36,500} \right)^{20} \right)^{0.5}} \right) + \left( 2.21 \ln \left( \frac{Re}{7} \right) \right)^{10} \right)^{0.2} \quad (11)$$

$$f_{s\_turb} = \frac{0.0791}{Re^{0.25}} \quad 4,000 < Re < 10^5 \quad (12)$$

여기서,  $f_{s\_lam}$ ,  $f_{s\_trans}$  및  $f_{s\_turb}$ 는 각각 직선 튜브에서 층류, 천이 및 난류 영역의 마찰계수를 나타낸다. Fig. 3은 본 실험에서 구한 직선 튜브의 마찰계수와 식 (10)-(12)를 비교한 그래프이다.

실험 결과와 상관식(식 (10)-(12))이 최대 -11.7%이내로 일치했고, 이로써 실험장치가 올바르게 설치되었음을 검증하였다.

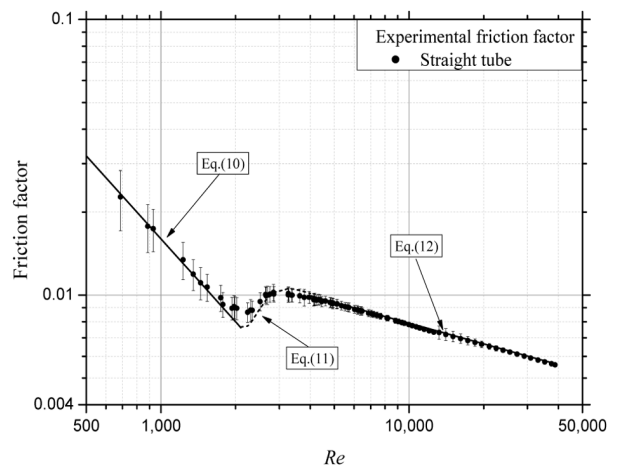


Fig. 3. Correlation of friction factors between experimental results and correlations in the straight tube.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 실험 결과와 기존 상관식에 의한 임계 레이놀즈수 비교

측정된 차압을 통해 계산된 헬리컬 코일 튜브에서의 레이놀즈수에 따른 마찰계수가 Fig. 4에 나타나있다.

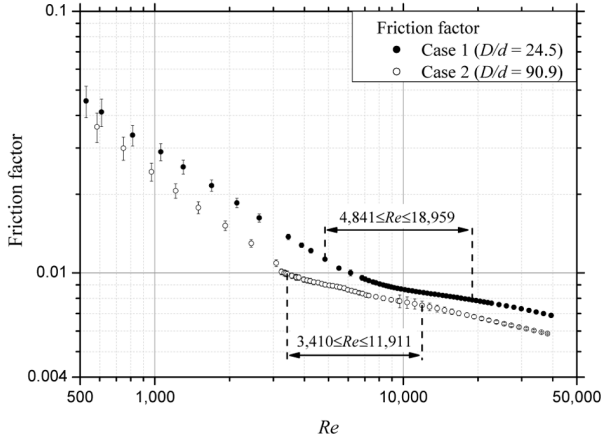


Fig. 4. Comparisons of friction factors and transition flow regimes in helical coil tubes.

Table 2. Correlations of critical Reynolds number ( $Re_c$ ) for curved tubes in previous studies

Author	Correlation	Conditions
Ito <sup>13)</sup>	$Re_c = 2,000 \left[ 1 + \frac{13.2}{(D/d)^{0.6}} \right]$ (13)	$15 < \frac{D}{d} < 860$
Kubair & Varrier <sup>14)</sup>	$Re_c = \frac{12,730}{(D/d)^{0.32}}$ (14)	$10 < \frac{D}{d} < 2,000$
Schmidt <sup>15)</sup>	$Re_c = 2,300 \left[ 1 + \frac{8.6}{(D/d)^{0.32}} \right]$ (15)	$\frac{D}{d} < 200$
Srinivasan et al. <sup>16,17)</sup>	$Re_c = 2,100 \left[ 1 + \frac{12}{(D/d)^{0.5}} \right]$ (16)	$\frac{D}{d} < 200$
Mishra & Gupta <sup>18)</sup>	$Re_c = 20,000 \left[ \frac{1}{\left( \frac{D}{d} \left[ 1 + \left( \frac{p}{2\pi D_h} \right)^2 \right] \right)^{0.32}} \right]$ (17)	Helical coil tubes
Cioncolini & Santini <sup>4)</sup>	$Re_c = \frac{12,500}{(D/d)^{0.31}}$ (18)	$30 < \frac{D}{d} < 110$

이를 통해 확인한 Case 1과 Case 2의 임계 레이놀즈수 ( $Re_c$ )는 각각 4,841과 3,410으로 나타나는데, 이로써 헬리컬 코일 튜브의 곡률비( $D/d$ )가 작을수록 임계 레이놀즈수가 커지는 것으로 판단된다.

Ghobadi와 Muzychka<sup>3)</sup>는 기존 연구에서 제시된 곡선 튜브에 대한 임계 레이놀즈수를 구하는 식을 정리하였다(Table 2). 그리고 이를 실험 결과와 비교한 값들이 Table 3에 나타나 있다.

Table 3. Critical Reynolds number ( $Re_c$ ) obtained from this work and previous studies

	$Re_c$	
	Case 1	Case 2
This work	4,841	3,410
Eq.(13)	5,869	3,764
Eq.(14)	4,571	3,007
Eq.(15)	9,403	6,972
Eq.(16)	7,186	4,743
Eq.(17)	7,182	4,724
Eq.(18)	4,635	3,088

Table 4. Correlations of friction factors for the laminar flow regime in previous studies

Author	Correlation	Geometry
Prandtl <sup>19)</sup>	$f_c/f_s = 0.29De^{0.36}$ $40 < De < 2,000$	(19) Coiled
Srinivasan <sup>16)</sup>	$f_c/f_s = \begin{cases} 0.419De^{0.275} & \text{for } 30 < De < 300 \\ 0.1125De^{0.5} & \text{if } De > 300 \end{cases}$ (20)	Coiled
Ju <sup>6)</sup>	$f_c/f_s = 1 + 0.015Re^{0.75}(d/D)^{0.4}$ $De > 11.6, Re < Re_c$	(21) Coiled
Manlapaz & Churchill <sup>7)</sup>	$f_c/f_s = \left[ \left( 1 - \frac{0.18}{\left[ 1 + (35/De)^2 \right]^{0.5}} \right)^m + \left( 1 + \frac{d/D}{3} \right)^2 \left( \frac{De}{88.33} \right) \right]^{0.5}$ $m = \begin{cases} 2 & \text{if } De < 20 \\ 1 & \text{for } 20 < De < 40 \\ 0 & \text{if } De > 40 \end{cases}$	(22) Coiled
White <sup>20)</sup>	$f_c/f_s = \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{11.6}{De} \right)^{0.45} \right)^{1/0.45} \right]^{-1}$ $11.6 < De < 2,000$	(23) Curved
Ito <sup>13,21)</sup>	$f_c/f_s = \frac{21.5De}{(1.56 + \log De)^{5.73}}$ $13.5 < De < 2,000 \left( \sqrt{\frac{d}{D}} + 13.2 \left( \frac{d}{D} \right)^{1.1} \right)$	(24) Curved
	$f_c/f_s = 0.1033De^{0.5} \left[ \left( 1 + \frac{1.729}{De} \right)^{0.5} - 1 \right]^{-3}$	(25) Curved
Hasson <sup>22)</sup>	$f_c/f_s = 0.556 + 0.0969\sqrt{De}$ $30 < De < 2,000$	(26) Torus
Adler <sup>8)</sup>	$f_c/f_s = 0.1064De^{0.5}, Large De$	(27) Torus
Barua <sup>23)</sup>	$f_c/f_s = \frac{1.122^2}{4De} \left[ 1.181 + \left( 1.181^2 + \frac{De}{\sqrt{6}} \right)^{0.5} \right]^3$ $Large De$	(28) Torus
	$f_c/f_s = 0.509 + 0.0918\sqrt{De}, Large De$	(29)
Collins & Dennis <sup>24)</sup>	$f_c/f_s = 0.38 + 0.1028\sqrt{De}, Large De$	(30) Torus
Van Dyke <sup>9)</sup>	$f_c/f_s = 0.47136De^{0.25}$ $De > 30$	(31) Torus
Dennis <sup>25)</sup>	$f_c/f_s = 0.388 + 0.1015\sqrt{De}, Large De$	(32) Torus
Yanase <sup>26)</sup>	$f_c/f_s = 0.557 + 0.0938\sqrt{De}$ $96 < De < 10,000$	(33) Torus

결과적으로 실험 결과와 비교하여, Case 1과 -4.3% 그리고 Case 2와 -9.4%의 오차율을 보인 Cioncolini와 Santini<sup>4)</sup>가 제시한 상관식(식 (18))이 실험 결과의 임계 레이놀즈수와 가장 일치했다.

#### 4.2 실험 결과와 기존 상관식에서의 마찰계수에 대한 정량적 비교

실험으로 얻은 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수를 기존 연구들에서 제시한 상관식들과 비교해보았다. 기존 연구들의 실험 조건이 다양하고 헬리컬 코일의 형상과 유체의 물성치에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 다양한 상관식을 비교해볼 필요가 있다.

##### 4.2.1 층류 영역

Ghobadi와 Muzychka<sup>3)</sup>는 기존 연구들로부터 고리형, 곡선형 및 코일형 튜브의 층류 영역에 대한 마찰계수 상관식들과 개념을 정리하였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 실험 조건과 같은 단수 범위에 해당하는 상관식들을 발췌하여 Table 4에 정리하였고, Case 1과 기존의 상관식들을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

Adler<sup>8)</sup>의 상관식(식 (27))은 실험 결과와 비교하여 최소 -13.8%에서 최대 -26.8%의 큰 오차율을 보였고, 실험 결과의 오차 범위 또한 모두 벗어났다. 이는 고리형상에서 얻은 상관식으로 헬리컬 코일 튜브에는 맞지 않는 것으로 판단된다.

나머지 상관식들은 실험 결과와 비교하여 대부분 오차 범위 안에 속하는 것을 확인할 수 있었고, 최소 0.1%에서 최대 -11.2%의 오차율로 실험 결과와 일치하

는 것을 확인하였다.

이 중 실험 결과와 가장 일치하는 상관식은 Ito<sup>13)</sup>가 실험적인 방법으로 제시한 상관식(식 (24))으로 실험 결과와 비교하여 최소 0.1%에서 최대 2.1%의 차이를 보였다. 이로써 Ito<sup>13)</sup>의 상관식(식 (24))이 헬리컬 코일 튜브에서의 층류 영역 마찰계수를 예측하기 위한 가장 적합한 상관식으로 판단된다.

##### 4.2.2 천이 영역

헬리컬 코일 튜브에 대한 기존의 많은 연구들에도 불구하고 천이 영역의 마찰계수를 알 수 있는 식은 제시되어 있지 않다. 따라서 본 실험에서 사용된 헬리컬 코일들의 천이 영역에 대한 마찰계수 특성을 분석하고, 헬리컬 코일 튜브의 곡률비에 따른 천이 영역의 마찰계수 양상이 어떠한지 비교해보았다(Fig. 4). 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수는 천이 영역에서 완만하게 감소하고 난류 영역에 가까워지면서 기울기가 일정해지는 모습을 보였다.

Case 1과 Case 2의 천이 영역 레이놀즈수 범위는 각각  $4,841 \leq Re \leq 18,959$ 와  $3,410 \leq Re \leq 11,911$ 로 나타나는데, 구체적으로 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 73.0% 감소할 때 임계 레이놀즈수는 42.0% 증가하고, 천이 영역의 레이놀즈수 범위는 66.1% 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 보아 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 작을수록 임계 레이놀즈수가 커지고 천이 영역이 넓어지는 것으로 판단된다.

##### 4.2.3 난류 영역

Ito<sup>13,21,27)</sup>는 헬리컬 코일 튜브에서 층류 영역의 상관식(식 (24), (25)) 뿐만 아니라 난류 영역의 상관식(식 (34))도 제시하였다.

$$f_{c, Ito-turb} = 0.076Re^{-0.25} + 0.00725(D/d)^{-0.5} \quad (34)$$

$$\Leftrightarrow Re \geq 15,000 \cup 5 \leq D/d \leq 2,000$$

Ito<sup>27)</sup>의 상관식(식 (34))과 실험 결과를 비교한 그래프가 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 식 (34)는 난류 영역에서 Case 1의 경우 최소 0.1%에서 최대 1.9%로 실험 결과와 상당히 일치했지만, Case 2의 경우는 최소 5.8%에서 최대 6.2%로 실험 결과보다 큰 값을 나타냈다. 이로써 Ito<sup>27)</sup>의 난류 영역에서의 마찰계수 상관식(식 (35))은 헬리컬 코일 튜브의 곡률비

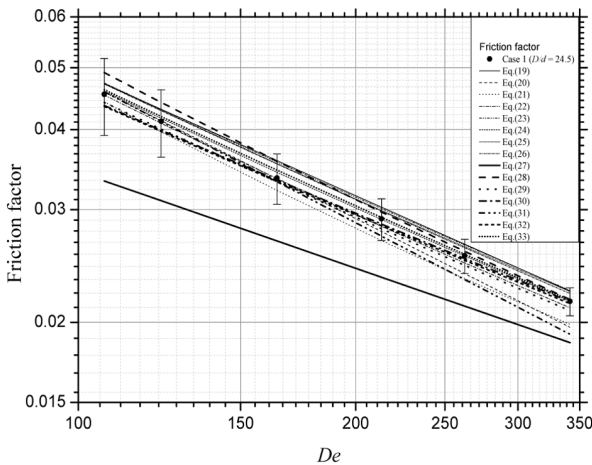


Fig. 5. Comparisons of friction factors for the laminar flow regime between experimental results for case 1 and previous correlations.

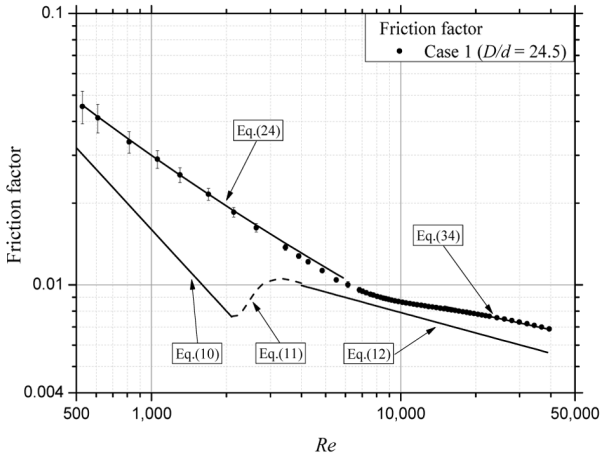


Fig. 6. Comparisons of friction factors between experimental results for case 1 and correlations.

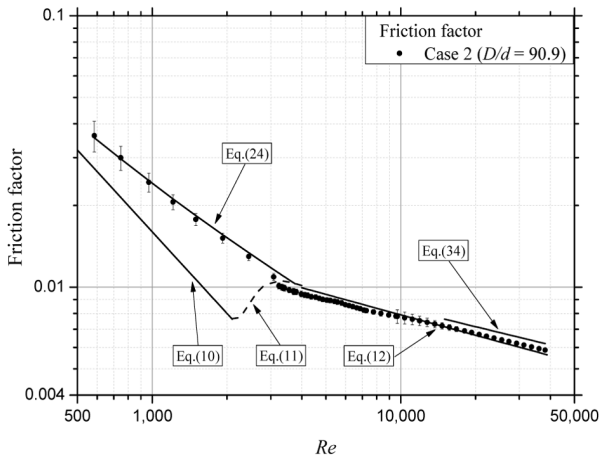


Fig. 7. Comparisons of friction factors between experimental results for case 2 and correlations.

가 작아질수록 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다.

#### 4.3 헬리컬 코일 튜브와 직선 튜브에서의 마찰계수 비교

헬리컬 코일 튜브와 직선 튜브에서의 마찰계수를 비교한 그래프가 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 Case 1의 마찰계수는 전체 유동 영역에서 직선 튜브의 마찰계수보다 컸지만, Case 2의 마찰계수는  $3,626 \leq Re \leq 11,040$ 의 범위의 천이 영역에서 직선 튜브의 마찰계수보다 작았다.

층류 영역에서 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수는 직선 튜브의 것과 비교하여 Case 1의 경우 최대 2.3 배, Case 2의 경우는 최대 1.8 배 컸다. 그리고 난류 영역에서는 Case 1의 경우 최대 1.2 배, Case 2의 경우는 최대 1.1 배로 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수가 직선 튜브에

서의 마찰계수보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 이로써 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 작을수록 난류 영역보다는 층류 영역에서의 마찰계수가 크게 증가하는 것을 알 수 있었고, 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 클수록 난류 영역에서 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수는 직선 튜브의 마찰계수와 같아지는 경향을 보였다.

또한, 직선 튜브에서의 마찰계수가 천이 영역에서 증가하는 것과 달리 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수는 천이 영역에서 완만한 곡선의 형태로 감소하는 모습을 나타냈으며, 직선 튜브에 비해 천이 영역의 범위가 넓고 임계 레이놀즈수가 큰 것을 관찰할 수 있었다.

### 5. 결론

본 실험은 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수를 구하여 그것을 분석하고, 기존 연구들에서 얻은 상관식들과 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 작을수록 임계 레이놀즈수가 크고 천이 영역이 넓었으며, Cioncolini와 Santini<sup>4)</sup>가 제시한 상관식이 실험에서 얻은 임계 레이놀즈수와 가장 일치했다.

2) Ito<sup>13,27)</sup>가 제시한 상관식은 층류 영역에서 작은 오차율로 실험 결과와 가장 일치했고, 난류 영역에서는 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 작을수록 실험 결과와 일치했다.

3) 직선 튜브의 마찰계수와 비교하여 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 감소할 때 헬리컬 코일 튜브의 층류 영역 마찰계수 증가율이 난류 영역의 마찰계수 증가율보다 컸다.

4) 헬리컬 코일 튜브의 곡률비가 커질수록 난류 영역에서 헬리컬 코일 튜브의 마찰계수는 직선 튜브의 마찰계수와 같아지는 경향을 보였다.

본 실험에서는 튜브의 직경과 코일의 피치를 일정하게 하고, 유량과 헬리컬 코일의 지름만을 변수로 적용하여 헬리컬 코일 튜브의 곡률비를 달리하였다. 향후 유량과 다른 변수들에 대한 실험을 추가로 진행하여 헬리컬 코일 튜브에서의 마찰계수에 대한 일반적인 상관식을 도출하고, 그것을 헬리컬 코일 튜브에서의 수격현상에 대한 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

감사의 글: 본 연구는 2017년 국가과학기술연구회

및 한국기계연구원의 지원으로 수행되는 주요사업의 일환으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) S. K. Lee and C. S. Yang, "Water-hammer in the Pump Pipeline System with and without an Air-Chamber", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 1, pp. 1-7, 2011.
- 2) G. H. Yoo, Y. K. Kim, G. S. Shin and T. W. Park, "Vibration Analysis on the Variable Configurations of Tube Conveying Fluid", J. Korean Soc. Saf., Vol. 16, No. 1, pp.25-30, 2001.
- 3) M. Ghobadi and Y. S. Muzychka, "A Review of Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Laminar Flow in Curved Circular Ducts", Heat Transfer Engineering, Vol. 37, No. 10, pp. 815-839, 2016.
- 4) C. Andrea and S. Lorenzo, "An Experimental Investigation Regarding the Laminar to Turbulent Flow Transition in Helically Coiled Pipes", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 30, No. 4, pp. 367-380, 2006.
- 5) M.R.H. Nobari and A. Malvandi, "Torsion and Curvature Effects on Fluid Flow in a Helical Annulus", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 57, pp. 90-101, 2013.
- 6) J. Huaiming, H. Zhiyong, X. Yuanhui, D. Bing and Y. Yu, "Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical Coil-pipe", Nuclear Science Technology, Vol. 18, pp. 826-831, 2001.
- 7) R. L. Manlapaz and S. W. Churchill, "Fully Developed Laminar Flow in Helically Coiled of Finite Pitch", Chemical Engineering Communication, Vol. 7, pp. 57-78, 1980.
- 8) M. Adler, "Flow in Curved Tubes", Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 14, pp. 1659-1675, 1934.
- 9) M. Van Dyke, "Extended Stokes Series: Laminar Flow Through a Loosely Coiled Pipes", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 86, pp. 129-145, 1978.
- 10) F. M. White, "Fluid Mechanics", MCGraw-Hill Education Korea, pp. 366-392, 2012.
- 11) JCGM 100:2008, "Evaluation of Measurement Data Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with minor corrections)", Paris:BIPM Joint Committee for Guides in Metrology, pp. 1-27, 2008.
- 12) S. W. Churchill, "Comprehensive Correlating Equations for Heat, Mass and Momentum Transfer in Fully Developed Flow in Smooth Tubes", Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 16, pp. 109-116, 1977.
- 13) H. Ito, "Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes", American Society of Mechanical Engineers Journal of Basic Engineering Transaction, Vol. 81, pp. 123-132, 1959.
- 14) V. Kubair and C. B. S. Varrier, "Pressure Drop for Liquid Flow in Helical Coils", Transactions of Indian Institute of Chemical Engineering, Vol. 14, pp. 93-97, 1961-1962.
- 15) D. F. Schmidt, "Warmeubarang and Druckverlust in Rohrshlangen", Chemical Engineering Technology, Vol. 13, pp. 781-789, 1967.
- 16) P. S. Srinivasan, S. S. Nadapurkar and F. A. Holland, "Pressure Drop and Heat Transfer in Coils", Chemical Engineering Journal, Vol. 218, pp. CE113-CE119, 1968.
- 17) P. S. Srinivasan, S. S. Nadapurkar and F. A. Holland, "Friction Factors for Coils", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 48, pp. T156-T161, 1970.
- 18) P. Mishra and S. N. Gupta, "Momentum Transfer in Curved Pipes 1. Newtonian Fluids; 2. Non-Newtonian Fluids", Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 18, pp. 130-142, 1979.
- 19) L. Prandtl, "Erzeugung von Zirkulationen beim Schütteln von Gefahren", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 29, No. 1, pp. 8-9, 1949.
- 20) C. M. White, "Fluid Friction and Its Relation to Heat Transfer", Transactions of Institution of Chemical Engineering (London), Vol. 10, pp. 66-86, 1929.
- 21) H. Ito, "Flow in Curved Pipes", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 49, pp. 653-662, 1969.
- 22) D. Hasson, "Streamline Flow Resistance in Coils", Reservoir Correspondence, Vol. 1, pp. S1, 1955.
- 23) S. N. Barua, "On Secondary Flow in Stationary Curved Pipes", Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 6, pp. 61-77, 1963.
- 24) W. M. Collins and S. C. R. Dennis, "The Steady Motion of a Viscous Fluid in a Curved Tube", Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 28, pp. 133-156, 1975.
- 25) S. C. R. Dennis, "Calculation of the Steady Flow Through



- a Curved Tube Using a New Finite-Difference Scheme”,  
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 99, pp. 449-467, 1980.
- 26) S. Yanase, N. Goto and K. Yamamoto, “Dual Solution of  
the Flow Through a Curved Tube”, Fluid Dynamics  
Research, Vol. 5, pp. 191-201, 1989.
- 27) H. Ito, “Pressure Losses in Curved Ducts: Coils”,  
Engineering Science Data Unit, London:IHSESDU,  
1977.