https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.293

Special Issue : Seoul Tech Capstone Design

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

# 헬리컬 코일 내 층류유동에서의 마찰 및 열전달 특성에 대한 수치해석 연구

김정우<sup>a\*</sup>, 허현<sup>a</sup>

# Numerical Investigation of Friction and Heat Transfer Characteristics of Laminar Flow in Helically Coiled Pipes

Jungwoo Kim<sup>a\*</sup>, Hyeon Heo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

#### ARTICLE INFO

Article his	tory:								
Received	29	April	2018						
Revised	12	June	2018						
Accepted	14	June	2018						
Keywords:									
Helically coiled pipes									
Curved pipes									
Friction coefficient									
Heat transfer coefficient									

#### ABSTRACT

In this study, we have numerically investigated the friction characteristics and heat transfer coefficients for laminar flow in helically coiled pipes. Basic geometric shape parameters of helical coil geometry such as curvature and pitch (or torsion) were taken into account. The range of the geometric shapes considered in this study exceeds the range available in literature. Thus, the present study supplements existing results. The results obtained in this study are, to a certain extent, different from existing correlations and results. Furthermore, our results indicate that the assumption that friction and heat transfer coefficients in helically coiled pipes can be estimated by applying modified diameters to the correlations for curved pipes is not correct.

> 위의 연구들을 포함하여 지금까지 연구들 대부분은 난류 유동에 대해 초점을 맞춰 이루어졌다. 그러나 Huttl *et al.*<sup>[8]</sup>을 시작으로

> 최근 Conte and Peng<sup>[9]</sup>, Gupta et al.<sup>[10]</sup>, De Amicis et al.<sup>[11]</sup>

연구들까지 헬리컬 코일 내 층류 유동에 대한 연구가 지속적으로

이루어지고 있다. 최근에는 microfluidics와 nanofluidics에 대한

응용성 관점에서도 관심이 증대되고 있는 실정이라고 볼 수 있다<sup>21</sup>. 헬리컬 코일 내 유동은 기본적으로 열교환기 관점에서 흥미가

있는 관계로, 헬리컬 코일 내 유동장과 열전달 특성을 나타내는 대

표적 인자인 Nu수와의 관계에 대한 연구들이 다수 존재한다. 그러 나 헬리컬 코일의 경우 직접 이론이나 실험적으로 접근하기 어려운

관계로 곡관에 대해 알려진 Nu식을 변형해서 쓰는 방식으로 열전

현<sup>[7]</sup>도 그 사례라고 할 수 있다.

달을 예측하는 경우가 다수 존재한다.

### 1. 서 론

헬리컬 코일 내 유동은 기하학적 형상으로 인해 발생하는 원심력 (centrifugal force)이 존재하며, 이에 따라 2차유동이 발생하여 직 관에 비하여 열전달이 향상된다는 사실이 잘 알려져 있다. 따라서, 헬리컬 코일 내 유동은 열교환기 관점에서 선박 또는 발전시스템 등 다수의 공학적 문제에 많이 이용되는 유동 형태이다<sup>[1-5]</sup>. 이런 관계로 헬리컬 코일 내 유동은 위에서 서술된 바와 같이 많은 연구 들의 대상이 되어 왔다. 또한 Vashisth *et al.*<sup>[4]</sup>에 따르면 미국에서 는 지금까지 헬리컬 코일과 관련하여 5,000여 개의 특허가 있다고 하며, 이를 보면 실용적으로 많은 관심을 받는 문제임을 알 수 있 다. 우리나라에서도 헬리컬 코일 내 유동에 대한 연구가 다수 존재 하며, 원자로 발전소 내 증기발생기에 관련된 윤동혁 외<sup>[6]</sup>와 곽승

293

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6856 Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: kimjw@seoultech.ac.kr (Jungwoo Kim).

p/D

0.025~0.25

0.0375~0.375

0.1~0.2

0.01~0.3

0.13~0.42

0.2~2.56

0.05, 0.15

1	k	$\tau = 0$	0.05	0.1	0.16	0.2
0.01	d/D	0.005	0.13	0.505	1.285	2.005
	p/D	0	2.5	5	8	10
	p/d	0	19.2	9.9	6.22	4.98
0.05	d/D	0.025	0.05	0.125	0.28	0.425
	p/D	0	0.5	1	1.6	2
	p/d	0	10	8	5.69	3.76
0.1	d/D	0.05	0.0625	0.1	0.178	0.25
	p/D	0	0.25	0.5	0.8	1
	p/d	0	4	5	4.49	4
0.15	d/D	0.075	0.0833	0.108	0.16	0.9
	p/D	0	0.167	0.33	0.533	1.33
	p/d	0	2	3.07	3.32	1.47

Table 1 Values of curvature and pitch considered in the literature Table 2 Geometrical parameters considered in the present study

그러나 최근 수행된 곡관 내 층류유동에 대한 Canton et al.[12] 연구에 따르면, 곡관의 경우에도 일반적으로 많이 고려되는 Dean 수가 아니라 Reynolds 수와 곡률을 함께 고려해야 한다고 한다. 이런 점에서 헬리컬 코일 내 유동 및 열전달 특성도 위에서 서술한 기존 방식과 달리 Re, 곡률, 피치를 함께 고려해야 할 필요가 있다. 그러기 위해서는 곡관에 대한 Canton et al.<sup>[12]</sup>와 같이 헬리컬 코일 곡률 및 피치에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 하겠다. Table 1은 지금까지 연구된 헬리컬 코일 곡률 및 피치를 정리한 바를 보여준다. Table 1에서 볼 수 있듯이, 곡률 및 피치에 대한 영향을 명확히 확인하기에는 기존 연구된 범위가 충분하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 헬리컬 코일 곡률 및 피치에 대 한 보다 체계적인 매개변수 연구를 통해, 곡관에 대한 Canton et al.<sup>[12]</sup> 연구와 유사하게 헬리컬 코일에서도 기존에 알려진 바와 달 리 Re, 곡률, 피치가 함께 중요한 인자들인지 확인하고자 한다. 이 를 위하여 우선적으로 계산상의 효율성을 위하여 층류 유동에 대한 연구를 수행하고자 한다.

d/D

\_

0.11~0.0776

0.01~0.3

0.059

0.0884

Austen and Soliman<sup>[13]</sup>

Gupta et al.[10]

Jamshidi et al.[14]

Ko and Ting<sup>[15]</sup>

Salem et al.[16]

Xin and Ebadian<sup>[17]</sup>

Yang et al.<sup>[18]</sup>

### 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 헬리컬 코일 내 층류 유동에서의 마찰 및 열전달 특성을 이해하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려 하는 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$
(2)

$$\frac{\partial u_j T}{\partial x_j} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j}$$
(3)

여기서  $x_i$ 는 좌표계 방향이며,  $u_i$ 는 각 방향 속도 성분이다. 또한 p는 압력이다. 그리고 T는 온도이다. 식 (1)-(3)에서 볼 수 있듯이 층류유동임을 고려하여 정상상태를 가정하였다. 모든 값은 헬리 컬 코일 튜브 지름, 튜브 내 평균속도 등을 이용하여 무차원화되 며, 중요한 무차원수는 (1)-(3)에 제시된 바와 같이 Re, Pr이다. 식 (1)-(3)에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서는 중력의 영향은 무시 하였다.

본 연구에서 수치해석 방법에 공통적으로 이용된 해석 도구로는 ANSYS Fluent를 사용하였다. 식 (1)-(3)을 풀기 위하여 공간적으 로는 1차 정확도의 상류도식법을 선택하였다. 공간차분법으로서 1 차 정확도는 소산에러가 클 수 있지만, 본 연구는 층류 영역을 대상 으로 하므로 그에 따른 영향은 적을 것으로 판단된다.

문헌상에 따르면 헬리컬 코일 내 유동 특성은 Re수 외에

$$k = \frac{D/2}{(D/2)^2 + p^2} \tag{4}$$

$$\tau = \frac{p}{(D/2)^2 + p^2}$$
(5)

에 따라 달라지게 된다<sup>[8,19,20]</sup>. *D*는 헬리컬 코일 지름, *p*는 헬리 컬 코일 피치를 의미한다. 여기서 명시적으로 나타나지는 않지만 헬리컬 코일 튜브 지름 *d*로 무차원화되어 있으며, 구체적으로 본 연구에서는 *d* = 1 m로 하였다. 위의 식들에서 볼 수 있는 바와 같이, *k*와 *τ*는 헬리컬 코일 곡률과 피치와 관련된 값으로, 문헌상 에 따라 다른 방식으로 정의되는 경우가 있으며 본 연구에서는 Germano<sup>[20]</sup>와 Huttl *et al.*<sup>[8]</sup>에 따라 위의 정의를 채택하였다.

본 연구에서는 헬리컬 코일 내 층류 유동을 고려하기 위하여 Ito et al.<sup>[21]</sup>와 Noorani et al.<sup>[22]</sup>에 따라 층류로 간주할 수 있는 Re = 1000을 고려하였다. 참고로 Huttl et al.<sup>[8]</sup>에서도 Re = 1,000을 층류로 하여 연구를 수행한 바 있다. 이 때 Re수는 헬리컬 코일 튜브 지름 (d)과 헬리컬 코일 내 평균속도 (U)로 정의하였다. 작동 유체는 물로 하였다. 따라서 Pr수는 5이다.



Fig. 1 Some examples of helical coils (k = 0.1) considered in the present study



Fig. 2 Example of mesh considered in the present study

속도에 대하여 입구 조건으로는 균일 속도를, 출구 조건으로는 균일 압력을 고려하였다. 또한 온도에 대하여는 균일 열유속 조건 (40 W/m<sup>2</sup>)을 고려하였다.

본 연구에서는 헬리컬 코일 곡률 및 피치 영향을 보다 자세히 살펴보기 위하여 앞에서 서술한 (k,  $\tau$ )에 대해 Table 1과 같은 범위 를 고려하고자 한다. Table 1에는 각각의 (k,  $\tau$ )에 대해 상응하는 (d/D, p/D)를 같이 나타내었다. 또한 p/d를 추가로 괄호 안에 표 시하였다. Table 1에 보여지는 바와 같이, 일부 (k,  $\tau$ )에 대해 d/D > 1인 경우가 있으며, 이는 실제로 존재하지 않는 경우이다. 이런 경우는 Table 2에 보여지는 바와 같이 빨간색으로 별도로 표 시하였다. 결과적으로 본 연구에서는 Table 2에 검정색으로 표시 한 경우들만 계산을 수행하였다. Table 2에서 볼 수 있는 바와 같 이 본 연구에서 고려하고 있는 헬리컬 코일 피치는 헬리컬 코일 지름에 비해 큰 경우들이 다수 포함되고 있으며, 이 경우들은 서론 에 서술한 바와 따라 기존 연구에서 잘 다루지 않는 조건들에 해당 한다(Table 1 참조).

Fig. 1은 Table 2에 제시된 조건들 중 k=0.1에 대한 헬리컬 코일을 실제로 보여준다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 벽면에서의 속 도와 온도 구배 예측을 위하여 inflation layer 기법을 사용한 것을 확인할 수 있다. 또한 곡관이나 헬리컬 코일 축방향으로는 sweep 기법을 이용하여 축방향 격자가 균일한 크기가 되도록 하였다. 이 에 따른 격자 구성 사례는 Fig. 2에 제시되어 있다. 전체 격자수는 약 10만개이며, 단면 격자수는 약 500개이다.

					<b>`</b>	•
1	ĸ	$\tau = 0$	0.05	0.1	0.16	0.2
0.01	De	100	100	100	100	100
	Gn	0	50	100	150	200
0.05	De	223.6	223.6	223.6	223.6	223.6
	Gn	0	50	100	150	200
0.1	De	316	316	316	316	316
	Gn	0	50	100	150	200
0.15	De	387	387	387	387	387
	Gn	0	50	100	150	200

Table 3 De and Gn numbers considered in the present study



Fig. 3 Streamline and temperature contours with respect to curvature ratio in curved pipes

Table 3에는 Table 1에 제시된 (k, τ)에 따른 De수와 Gn수를 정리하여 보여준다. 여기서 De=Re √k, Gn=Re • τ로 정의된다. 앞에서 서술한 바와 같이 k와 τ는 문헌상에 따라 다른 방식으로 정의되는 경우가 있으므로, 다른 문헌 결과와 본 연구 결과를 비교 할 때 주의가 필요한 부분이라고 하겠다.

#### 3. 해석 결과

본 연구에서는 Table 2 (또는 Table 3)에 보여지는 바와 같이 헬리컬 코일 내 층류 유동을 보다 면밀히 연구하기 위하여, 곡관 내 층류 유동을 함께 연구하였다. Fig. 3은 k = 0.01, 0.05, 0.1인 곡관 내 층류 유동에 대해 완전발달지점에서의 속도와 온도에 대한 분포를 보여준다. Fig. 3에 볼 수 있는 바와 같이, 곡관 내 유동은 잘 알려진 바와 같이 2차 유동을 가지는 것을 알 수 있다<sup>[2]</sup>.

Fig. 4와 Fig. 5는 본 연구에서 고려한 곡관 내 층류 유동에 대한 완전발달지점에서의 마찰계수와 열전달계수를 곡률 k에 따라 보여 준다. 여기서 마찰계수와 열전달계수는 같은 Re수에서의 직관에 대한 값으로 무차원화되었으며, 이런 방식은 Ito *et al.*<sup>[21]</sup>에 따라 제시된 바를 따른 것이다. 완전발달지점은 하류에서의 서로 다른 위치에서의 속도와 온도 비교를 통해 확인하였다. 발달영역에 대한 결과는 본 연구에서는 따로 제시하지 않는다. Fig. 4와 Fig. 5에는



Fig. 4 Friction coefficients in curved pipes. Solid circle; Present result, Solid line; Ito *et al.*<sup>[21]</sup>,  $f_c/f_s = 21.5De/(1.56 + \log De)^{5.73}$ (13.5<*De*<2000)



Fig. 5 Nusselt numbers in curved pipes. Solid circle; Present result, open circle, Yang *et al.* (1995); Solid line; Kalb and Seader<sup>[23]</sup>,  $Nu_c/Nu_s = 0.913De^{0.476} Pr^{0.2}/4.36$  (80  $\leq De \leq 1,200, 0.5 \leq Pr \leq 5$ )

비교를 위하여 Ito *et al.* 등 기존 데이터를 포함하였다. 이 때 기존 데이터는 Ito *et al.*<sup>[21]</sup>  $f_d/f_s = 21.5De/(1.56 + \log De)^{5.73}$ 와 같이 De수로 정의되는 경우가 대부분인 관계로, Fig. 4와 Fig. 5에는 해당 곡률 k에 대한 De수를 가지고 상관식값을 구하는 방식을 이 용하여 값을 정리하였다.

Fig. 4에 볼 수 있는 바와 같이, 현재 계산된 곡관 내 층류 유동에 대한 마찰계수는 Ito *et al.*<sup>[21]</sup> 등이 제시된 기존 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. De Amicis *et al.*<sup>[11]</sup> 연구에 따르면 상관식 정확도는 +/- 20% 정도 볼 수 있다. 또한 열전달계수도 마 찰계수와 비교하여 상대적으로 기존 결과와 차이를 보이나, 문헌상 에서 볼 수 있는 바와 같이 기존 결과들도 같은 De수에 대해서 차이를 보이는 것을 고려할 때 De수만을 고려하여 곡관 내 열전달 계수를 나타나는 것은 한계가 있다고 할 수 있다. 여기서 일반적으 로 직관 내 Nu수는 Pr수에 무관한 반면, 곡관 내 Nu수는 Pr수에 의존하는 경향을 가짐에 유의할 필요가 있다.

최근 Canton *et al*.<sup>[12]</sup>에서는 광범위한 조건에 대한 연구를 통해 마찰계수를 De수가 아니라 (Re, d/D)에 따라 정리되어야 한다고



Fig. 6 Streamline and temperature contours with respect to torsion ratio in helical coiled pipes (k = 0.01)

보고한 바 있다. 유사하게 열전달계수도 De수가 아니라 (Re, d/D) 에 따라 정리될 필요가 있다고 할 수 있다.

다음으로 본 논문의 중심주제인 헬리컬 코일 내 층류 유동에 대 한 결과를 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 6은 *k*=0.01일 때 헬리컬 코일 내 층류 유동에 대해 완전발 달지점에서의 속도와 온도에 대한 분포를 보여준다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 동일한 *k*에 대해서도 피치가 있는 경우, Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 곡관 내 층류유동에서 관찰되는 2차 유동 대칭성이 깨지게 되며, 이는 Huttl *et al.*<sup>[8]</sup> 결과와 일치한다. 피치에 따른 2차유동의 변화는 온도 분포도 영향을 받게 된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 본 연구에서 고려한 헬리컬 코일 내 층류 유동 에 대한 마찰계수와 열전달계수를 보여준다. 여기서 마찰계수와 열 전달계수는 Fig. 4와 Fig. 5에 제시된 곡관도 동일하게 같은 Re수 에서의 직관에 대한 값으로 무차원화되었다. 또한 Table 1에서 제 시되었듯이, *τ*=0.2일 때는 *k*=0.01 조건은 계산하지 않은 관계로 제시하지 않았다.

Fig. 7을 보면, 헬리컬 코일 내 층류 유동에 대한 마찰계수는 동 일한 k를 가지는 곡관 내 층류 유동값과 비교하여 작음을 알 수 있다. 이런 결과는 Huttl *et al.*<sup>[8]</sup> 결과와 정성적으로 일치한다. 또 한 Ju *et al.*<sup>[24]</sup>이 제시한 상관식과 비교한 결과, 본 연구결과와 달 리 Ju *et al.*<sup>[24]</sup> 상관식값은 곡률에 따라 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이런 차이는 Ju *et al.*<sup>[24]</sup> 상관식에 Re, *d/D*만 고려되고 피치 (또는 비틀림)의 영향이 고려되지 않은 것에 기인할 수도 있다고 생각된다.

또한 Nu수에 대한 결과도 본 결과와 기존 결과 사이의 차이도 존재하지만, 기존 결과들 사이에도 정량적 및 정성적으로도 다름을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 피치 영향 외에 헬리컬 코일 형상 및 유동 조건 차이에 기인한 것으로 생각된다. 실제로 Cioncolini and Santini<sup>[25]</sup> 결과에 따르면 층류일 때 형상 조건에 따라 마찰계 수 변화가 크게 나오게 된다. Fig. 7과 Fig. 8를 비교할 때, 피치에 대한 영향은 마찰보다는 열전달 측면에서 상대적으로 크게 나타나



Fig. 7 Friction coefficients in helical coiled pipes. Red circle; Present,  $\tau = 0.1$ ; Green circle; Present,  $\tau = 0.2$ , Solid line; Ju *et al.*<sup>[24]</sup>  $f_h/f_s = 1 + 0.015 Re^{0.75} (d/D)^{0.4} (De > 11.6)$ : Red line,  $\tau = 0.1$ , green line,  $\tau = 0.2$ 



Fig. 8 Nusselt numbers in helical coiled pipes. Red circle; Present,  $\tau = 0.1$ ; Green circle; Present,  $\tau = 0.2$ , Red open square; Yang *et al.* (1995), Solid line; Xin and Ebadian<sup>[17]</sup>  $Nu_h/Nu_s = (2.153 + 0.318De^{0.643})Pr^{0.177}/4.36$ ; Dashed line; Janssen and Hoogendoorn<sup>[26]</sup>  $Nu_h/Nu_s = 0.7Re^{0.43}Pr^{1/6}$  $(d/D)^{0.07}/4.36$  (100 < De < 830): Red line,  $\tau = 0.1$ , green line,  $\tau = 0.2$ 

는 것을 확인할 수 있다.

헬리컬 코일 내 유동에 대한 마찰계수와 열전달계수에 대해 보통  $D^{'} = D[1 + (p/\pi D)^{2}]$ 에 기반하여 곡관에 대해 제시된 상관식을 그대로 이용하는 경우가 종종 있다. 예를 들어 Ju *et al.*<sup>[24]</sup> 상관식  $f_{h}/f_{s} = 1 + 0.015 Re^{0.75} (d/D)^{0.4}$  또는 Xin and Ebadian<sup>[17]</sup> Nu =  $(2.153 + 0.318 De^{0.643}) Pr^{0.177}$  등이 대표적이다. 본 연구에서의 결과 를 가지고 위 개념을 확인하기 위하여, Fig. 4와 Fig. 5에 제시된 곡 관에 대한 결과에 헬리컬 코일에 대한 결과를  $D^{'} = D[1 + (p/\pi D)^{2}]$ 를 이용하여 나타낸 결과를 추가하여 Fig. 9와 Fig. 10에 제시하 였다.

 Fig. 9와 Fig. 10에 볼 수 있는 바와 같이, 본 계산 결과 헬리컬

 코일 내 층류 유동에 대해서는 기존에 많이 사용되는 D'=D



Fig. 9 Friction coefficients based on modified coil diameter in helical coiled pipes. Red circle; Present, τ=0 (curved), Blue square; Present, τ=0.1; Green square; Present, τ=0.2, Solid line; Ito *et al.*<sup>[21]</sup> f<sub>c</sub>/f<sub>s</sub>=21.5De/(1.56+logDe)<sup>5.73</sup> (13.5 < De < 2000)</li>



Fig. 10 Nusselt numbers based on modified coil diameter in helical coiled pipes. Red circle; Present,  $\tau = 0$  (curved), Blue square; Present,  $\tau = 0.1$ ; Green square; Present,  $\tau = 0.2$ , Solid line; Kalb and Seader<sup>[23]</sup> Nu<sub>c</sub>/Nu<sub>s</sub> = 0.913  $De^{0.476}Pr^{0.2}/4.36$  ( $80 \le De \le 1200, 0.5 \le Pr \le 5$ )

[1+(p/πD)<sup>2</sup>] 개념이 잘 적용되지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 특히 상대적으로 마찰보다는 Nu수에 대한 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 여기서 k는 D가 아니라 D<sup>'</sup>를 이용하여 정의되었 다. Fig. 9와 Fig. 10에서 곡관과 헬리컬 코일 값을 비교해 보면, 마찰은 헬리컬 코일일 때 크게 나오고 열전달은 헬리컬 코일일 때 작게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 헬리컬 코일일 때 곡관보다는 마찰 대비 열전달 효율이 감소하는 것을 의미한다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 헬리컬 코일 내 층류 유동 완전발달 조건에서의 마찰계수와 열전달계수 특성을 수치해석을 이용하여 파악하였다. 기존 문헌들의 이론적 접근에 따라 (*d/D,p/D*)가 아니라 (*k*,*τ*)을 기본적인 헬리컬 코일 기하학적 형상 변수로 고려하였다. 본 연구 에서 고려한 기하학적 형상 범위는 기존 문헌에서 많이 연구되지 않은 범위도 포함하고 있어서 기존 연구 결과를 보충하는 측면이 있다.

헬리컬 코일 내 층류 유동을 계산하기 앞서, 곡관 내 층류 유동을 계산한 결과 마찰계수와 열전달계수값이 기존 상관식과 잘 일치함 을 확인하였다.

본 연구에서 얻은 헬리컬 코일 마찰계수와 열전달계수를 기존 상관식과 비교한 결과 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 서론에서 서술한 바와 같이 기존 연구에서는 헬리컬 코일에 대해 별도의 식 을 제시하기 보다는 곡관에 대한 식을 이용하는 경우가 대부분이 다. 본 연구 결과값을 기반으로 기존 연구 가정을 확인한 결과, 본 연구에서 고려한 조건에서는 그런 가정이 잘 적용되지 않음을 알 수 있었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 최근 곡관에 대한 Canton *et al.*<sup>[12]</sup> 연구 결과와 유사하게 헬리컬 코일 마찰계수와 열전달계수는 유동 장과 온도장에 영향을 미칠 수 있는 모든 인자들인 Re, De, Gn 또는 Re, *k*, *τ*에 따라 면밀히 검토되어야 함을 알 수 있다. 이런 관계식을 얻기 위해서는 Canton *et al.*<sup>[12]</sup> 연구처럼 Re, De, Gn에 대한 광범위한 범위를 고려하는 많은 경우들에 대한 후속 연구가 필요할 것이다. 이런 후속연구는 본 논문에서 보고된 현재 연구 결 과와 기존 결과 사이의 차이에 대해서도 설명할 수 있는 자료를 제공해 줄 수 있을 것이다.

또한 헬리컬 코일 열전달계수는 열경계조건에 따라서도 달라질 수 있으므로, 본 연구에서 고려하지 않은 일정 온도 조건에 대한 연구도 필요할 것이다.

# 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행 되었습니다.

#### References

- Berger, S. A., Talbot, L., Yao, L. S., 1983, Flow in Curved Pipes, Annu. Rev. Fluid Mech. 15 461-512.
- [2] Ghobadi, M., Mizychka, Y. S., 2016, A Review of Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Laminar Flow in Curved Circular Ducts, Heat Transfer Eng. 37 815-839.
- [3] Naphon, P., Wongwises, S., 2006, A Review of Flow and Heat Transfer Characteristics in Curved Pipes, Renewable Sustainable Eng. Rev. 10 463-490.

- [4] Vashisth, S., Kumar, V., Nigan, K. D. P., 2008, A Review on the Potential Applications of Curved Geometries in Process Industry, Ind. Eng. Chem. Res. 47 3291-3337.
- [5] Vester, A. K., Orlu, R., Alfredsson, P. H., 2016, Turbulent Flows in Curved Pipes: Recent Advances in Experiments and Simulations, Appl. Mech. Rev. 68 050802.
- [6] Yoon, D.-H., Park, J. Y., Seul, K.-W., 2012, Numerical Study of Turbulent Heat Transfer in Helically Coiled Tubes, KSME J. 36 783-789.
- [7] Kwag, S.-H., 2013, Numerical Analysis of Turbulent Flows in the Helically Coiled Pipes of Heat Transfer, J. Korean Soc. Marine Eng. 37 905-910.
- [8] Huttl, T. J., Wagner, C., Friedrich, R., 1999, Navier-Stokes Solutions of Laminar Flows Based on Orthogonal Helical Coordinates, Int. J. Numer. Meth. Fluids.
- [9] Conte, I. and Peng, X. F., 2008, Numerical Investigations of Laminar Flow in Coiled Pipes, Appl. Thermal Eng. 28 423-432.
- [10] Gupta, R., Wanchon, R. K., Jafar Ali, T. R. M., 2011, Laminar Flow in Helical Coils: a Parametric Study, Ind. Eng. Chem. Res. 50 1150-1157.
- [11] De Amicis, J., Cammi, A., Colombo, L. P. M., Colombo, M., Ricotti, M., 2014, Experimental and Numerical Study of the Laminar Flow in Helically Coiled Pipes, Prog. Nucl. Eng. 76 206-215.
- [12] Canton, J., Orlu, R., Schlatter, P., 2017, Characteristics of the Steady Laminar Incompressible Flow in Toroidal Pipes Covering the Entire Curvature Range, Int. J. Heat Fluid Flow.
- [13] Austen, D. S., Soliman, H. M., 1988, Laminar Flow and Heat Transfer in Helically Coiled Tubes with Substantial Pitch, Exp. Thermal Fluid Sci. 1 183-194.
- [14] Jamshidi, N., Farhadi, M., Gangi, D. D., Sedighi, K., 2012, Experimental Analysis of Heat Transfer Enhancement in Shell and Helical Tube Exchangers, Appl. Thermal Eng. 51 644-652.
- [15] Ko, T. H., Ting, K., 2006, Optimal Reynolds Number for the Fully Developed Laminar Forced Convection in a Helical Coiled Tubes, Energy 31 2142-2152.
- [16] Salem, M. R., Elshazly, K. M., Sakr, R. Y., Ali, R. K. 2016, Effect of Coil Torsion on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Shell and Coil Heat Exchanger, J. Thermal Sci. Eng. Appl. 8 011015.
- [17] Xin, R. C., Ebadian M. A., 1997, The Effects of Prandtl Numbers on Local and Average Convective Heat Transfer Characteristics in Helical Pipes, J. Heat Transfer 119 467-473.
- [18] Yang, G., Dong, Z. F., Ebadian, M. A., 1995, Laminar Forced Convection in a Helicoildal Pipe with Finite Pitch, Int. J. Heat Mass Transfer 38 853-862.

- [19] Wang, C. Y., 1981, On the Low-Reynolds-Number Flow in a Helical Pipe, J. Fluid Mech. 108 185-194.
- [20] Germano, M., 1989, The Dean Equation Extended to a Helical Pipe Flow, J. Fluid Mech. 203 289-305.
- [21] Ito, H., 1969, Laminar Flow in Curved Pipes, Zamm-Z Angew Math Met. 49 653-663.
- [22] Noorani, A., El Koury, G. K., Schlatter, P., 2013, Evolution of Turbulence Characteristics from Straight to Curved Pipes, Int. J. Heat Fluid Flow 41 16-26.
- [23] Kalb, C. E., Seader, J. D., 1972, Heat and Mass Transfer Phenomena for Viscous Flow in Curved Circular Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer 15

801-817.

- [24] Ju, H. Huang, Z., Xu, Y., Duan, B., Yu, Y., 2001, Hydraulic Performance of Small Bending Radius Helical-Coil Pipe, J. Nucl. Sci. Tech. 18 826-831.
- [25] Ciocolini, A., Santini, L., 2006, An Experimental Investigation Regarding the Laminar to Turbulent Flow Transition in Helically Coiled Pipes, Exp. Thermal Fluid Sci. 30 367-380.
- [26] Janssen, L. A. M., Hoogendoorn, C. J., 1978, Laminar Convective Heat Transfer in Helical Coiled Tubes, Int. J. Heat Mass Transfer 21 1197-1206.