

기울어진 덕트 내 헬리컬 코일의 자연대류 열전달

박주현 · 정범진[†]

경희대학교 원자력공학과

(2014년 4월 21일 접수, 2014년 5월 21일 수정, 2014년 5월 21일 채택)

Natural Convection Heat Transfer of an Inclined Helical Coil in a Duct

Joo-Hyun Park · Bum-Jin Chung[†]

Department of Nuclear Engineering, KyungHee University

(Received 21 April 2014, Revised 21 May 2014, Accepted 21 May 2014)

요 약

헬리컬 코일이 덕트 내부에 있을 때, 기울기에 따른 자연대류 열전달을 실험적으로 측정하였다. 고부력 조건을 구현하기 위하여 유사성에 기초하여 열전달 실험을 대신하여 물질전달 실험을 수행하였다. Ra_D 수 4.55×10^6 에서, 턴(Turn) 수를 1~10, P/D를 1.3~5, 헬리컬 코일의 기울기를 $0^\circ \sim 90^\circ$ 까지 변화시켰다. 헬리컬 코일의 턴 수가 1일 때, 측정된 Nu_D 수는 McAdams의 수평관 자연대류 열전달 상관식과 거의 일치하였다. 기울어진 덕트 내 헬리컬 코일의 자연대류 열전달은 피치, 턴 수, 덕트 높이에 따라 복합적으로 변화하였고 이는 속도 효과, 굴뚝 효과, 예열 효과로 분석되었다. 본 연구의 결과는 Compact heat exchanger에서의 자연대류 열전달에 대한 현상학적 분석에 기여한다.

주요어 : 헬리컬 코일, 도관, 자연대류, 열전달, 유사성, 전기도금시스템, 컴팩트 원자로 시스템, 기울기, 열교환기

Abstract - The natural convection heat transfers of a helical coil in a duct were measured experimentally varying the inclination. To achieve high Rayleigh number, mass transfer experiments instead of heat transfer experiments were performed based upon the analogy. The Ra_D was fixed to 4.55×10^6 . The turn numbers were 1~10. the pitch to diameter ratio were 1.3~5, and the inclination of the helical coil $0^\circ \sim 90^\circ$. The measured Nu_D for a single turn of the helical coil was very close to that from McAdams heat transfer correlation for a horizontal cylinder. The heat transfers of the helical coil were varied by the pith, number of turns, and duct height in a complex manner showing the velocity, chimney, and pre-heating effects. The results of the study contributes to the phenomenological analyses of the natural convection heat transfer of a compact heat exchanger.

Key words : Helical coil, Duct, Natural convection, Heat transfer, Inclination, Analogy, Electroplating system, Heat exchanger, Compact nuclear system.

1. 서 론

헬리컬(Helical) 튜브형 열교환기는 선박과 같이 공간적 제약이 있는 컴팩트 시스템(Compact system)

에서 흔히 채택된다. 헬리컬 코일(Helical coil)을 채택한 열교환기는 Straight tube 열교환기에 비해 열전달 면적이 크므로 공간대비 효율적이다. 이러한 컴팩트 열교환기가 선박에 적용되면, 운행 조건에 따라 기울기가 달라진다. 또한 펌프의 중단 등 문제 발생 시 강제대류가 아닌 자연대류에 의한 냉각이 필요하다.

[†]To whom corresponding should be addressed.
Department of Nuclear Engineering, Kyunghee University
Tel : 031-201-3893 E-mail : bjchung@khu.ac.kr

헬리컬 코일 열교환기(Helical coil heat exchanger)에 관한 연구는 많은 학자들에 의해 수행되었으나, 굴뚝 내의 기울어진 헬리컬 코일에서 발생하는 자연대류 열전달에 대한 현상학적 연구는 매우 제한적이다⁽¹⁻³⁾. 또한 수행된 연구의 대부분은 강제대류 또는 헬리컬 코일의 튜브(Tube) 내부 열전달에 관한 것이다⁽⁴⁻⁶⁾.

수직 헬리컬 코일의 각 튜브에서 발생하는 자연대류는 약간 기울어진 관(Cylinder)이 연달아 위치하는 경우의 자연대류와 현상학적으로 유사하다. 하단 Coil에서 발생하는 플룸(Plume)은 상단 Coil의 열전달에 영향을 준다. 헬리컬 코일이 수직인 경우는 나란히 배열된 관(In-lined cylinders)과 유사하고 헬리컬 코일이 기울어지면 코일(Coil)들의 배열이 엇갈리게 된다. 또한, 헬리컬 코일의 케이스는 플룸의 분산을 막아주어 마치 굴뚝과 같은 영향을 준다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 기울어진 헬리컬 코일의 구조이다. 그림에서 H, D, P, L, R, θ 은 각각 헬리컬 코일의 감겨진 높이, 튜브의 지름, 코일 사이의 이격 거리, 튜브의 전체 길이, 코일의 감긴 반지름 그리고 헬리컬 코일의 기울기를 각각 나타낸다. N은 헬리컬 코일의 감긴 수를 나타낸다.

본 연구에서는 굴뚝 내부에 있는 헬리컬 코일의 자연대류 열전달을 실험적으로 연구하였다. 열전달과 물질전달의 유사성(Analogy)개념을 이용하여 열전달 실험대신에 물질전달 실험을 수행하였다. 물질전달계로는 황산-황산구리 수용액($H_2SO_4-CuSO_4$)의 전기도 급계를 채택하였다. 실험의 Pr 수는 2,094이고 Ra_D 수

는 4.55×10^6 이다. 헬리컬 코일의 D는 0.003m, P는 0.003m~0.015m, 기울기는 $0^\circ \sim 90^\circ$, N은 1~10인 범위에서 실험을 수행하였다.

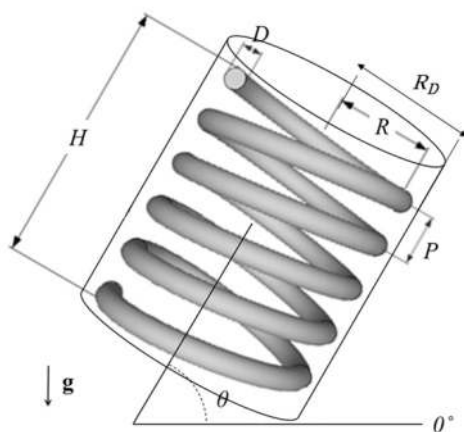
2. 이론적 배경

2-1. 수직 헬리컬 코일의 자연대류 열전달.

헬리컬 코일의 특성길이는 L, H, D, P, R이다. Heo and Chung⁽⁷⁾에 따르면, 수직 헬리컬 코일의 자연대류 열전달에서 주요 길이척도는 D이다. 또한, 코일의 이격된 거리를 나타내는 피치-직경비(Pitch-to-diameter ratio, P/D)는 헬리컬 코일에서 열전달 현상을 설명하는 주요인자이다. P/D가 5보다 클 때, P/D는 수직 헬리컬 코일에 미치는 영향이 측정되지 않았다. 반면 P/D가 5보다 작을 때, 하단 턴(Turn)에서 발생한 플룸(Plume)이 상단 코일의 열전달에 영향을 주어 헬리컬 코일의 열전달에 영향을 준다.

턴 수가 1인 수직 헬리컬 코일에서 발생하는 자연대류는 약간 기울어진 수평관의 그것과 유사하다. Heo and Chung⁽⁷⁾은 기울기 30 미만의 관에서 발생하는 자연대류 열전달과 수평관에서 발생하는 열전달이 5%의 차이로 유사한 것으로 보고하고 있다.

수직 헬리컬 코일의 일부분은 두 개의 수평관이 나란히 배열되어 있는 것으로 볼 수 있다. 이때, 하단 수평관에서 발생하는 플룸이 상단 수평관의 열전달에 미치는 영향은 크게 두 가지이다.⁽⁸⁾ : 예열 효과(Preheating effect)와 속도 효과(Velocity effect)이다. 첫째, 예열효과는 하단 수평관에서 발생한 뜨거운 플



- H : Height of the helical coil
- D : Diameter of the tube
- P : Pitch of the helical coil
- L : Length of the helical coil
- R : Winding radius of the coil
- R_D : Radius of the duct

Fig. 1. Inclined helical coil.

름이 상단 수평관에 도달하여 열전달을 저하시키는 현상을 말한다. 둘째, 속도효과는 플룸의 발생으로 상단 수평관에 초기 속도를 제공하여 유체속도가 증가 되면서 열전달을 향상시키는 현상을 말한다.

P/D가 1.5 이하의 경우 예열 효과가 지배적이고, P/D가 1.5 이상의 경우 속도 효과가 지배적이다. P/D가 2.6인 지점에서 속도 효과가 가장 강하게 발생한다. 예열 효과와 속도 효과는 턴 수의 증가와 함께 증가한다.

2-2. 기울어진 헬리컬 코일의 열전달.

헬리컬 코일이 수직일 때, 상단관은 하단관의 바로 위에 위치한다. 헬리컬 코일이 기울어지면 상·하단관은 엇갈리게 배열된다. 이에 따라 하단관에서 발생한 플룸이 상단관에 미치는 영향이 달라질 것이다.

2-3. 굴뚝효과.

굴뚝효과란 가열부에서 데워진 유체가 굴뚝 내부에서 부력을 받아 상승하면서 지속적으로 가속되어 속도가 증가하며 질량유량률이 증가되는 현상이다.

굴뚝 하단에 위치한 가열부는 플룸을 발생시킨다. 그리고 플룸은 부력을 받아서 굴뚝 상단으로 올라갈 수록 가속된다. 이는 플룸이 옆으로 확산되지 않고 상단으로 가속될 수 있도록 굴뚝이 보호관(Shroud) 역할을 하기 때문이다⁽⁹⁾.

굴뚝내의 유동은 어떤 높이에서도 평균질량유량률 (Mean Mass flow rate)이 같아야 한다. 따라서 굴뚝 입구에서는 유체의 온도가 낮아서 부력이 충분하지 않지만, 상단의 유동에 의해 빨려 올라가는 형태가 되어서 강제대류와 유사한 거동을 보인다⁽¹⁰⁾.

2-4. 유사성(Analogy)을 이용한 열/물질전달 실험방법.

열전달과 물질전달 시스템의 초기 및 경계조건이 같으면 수학적으로 서로 유사하다. 즉, 열전달 문제를 물질전달 문제로도 역으로 전환이 가능하다. 즉, 물질전달과 열전달은 수학적 취급방법이 유사하기 때문에 무차원수 관계는 표 1과 같다.

본 연구에서는 황산-황산구리 수용액의 전기도금계를 물질전달계로 이용하였다. 전기도금계의 한계전류를 이용한 물질전달 연구는 Levich⁽¹¹⁾에 의해 시도되었고, Selman and Tobias⁽¹²⁾에 의해 여러 조건에서 개발된 물질전달 상관식을 체계적으로 정립되어 현재 까지 물질전달에 널리 이용된다. 본 연구에서는 무차원수가 계산되는데 필요한 물성치를 알기 위해 Fenech and Tobias⁽¹³⁾가 제시한 관계식 (1)~(8)을 사용하여 계산하였다. 이와 같은 물성치는 22 °C에서 5% 이내의 오차로 잘 맞는다고 알려져 있다.

Ko et al⁽¹⁴⁾, Kang and Chung⁽¹⁵⁾은 다양한 기하구조와 유동 조건에 대하여 전기도금계를 이용한 물질전달 실험을 통해 열전달 현상을 모사할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 유사성을 이용한 전기도금 실험기법에 대한 내용은 Ko et al⁽¹⁴⁾의 논문에 보다 구체적으로 제시되어 있다.

전기도금계를 이용하여 물질전달계수를 구할 때, 음극 표면에서의 구리이온 농도를 알기 어렵기 때문에 한계전류기법을 이용한다⁽¹⁶⁾. 전기도금계에서 전극 사이에 인가된 전위차를 증가시키면 전류가 증가하다가 더 이상 증가하지 않는 플레투우(Plateau)영역이 나타나는데 이를 한계전류(Limiting current)라 한다. 한계전류에 이르면 음극표면에서의 구리이온 농도를 0으로 취급할 수 있기 때문에 식(9)에서 물질전달계수인 hm은 모액농도, Cb와 한계전류밀도, Ilim만으

Table 1. Dimensionless groups of analogy systems.

Heat transfer		Mass transfer	
Nusselt number	$\frac{h_h D}{k}$	Sherwood number	$\frac{h_m D}{k}$
Prandtl number	$\frac{\nu}{\alpha}$	Schmidt number	$\frac{\nu}{D_m}$
Rayleigh number	$\frac{g \beta \Delta T D^3}{\alpha \nu}$	Rayleigh number	$\frac{g D^3 \Delta \rho}{D_m \nu \rho}$

$$\rho(\text{kg} / \text{m}^3) = (0.9978 + 0.06406C_{\text{H}_2\text{SO}_4} - 0.00167C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^2 + 0.12755C_{\text{CuSO}_4} + 0.01820C_{\text{CuSO}_4}^2 - 0.00235C_{\text{Glycerol}} + 0.00353C_{\text{Glycerol}}^2) \times 10^{-3}. \quad (1)$$

$$\mu(\text{cp}) = 0.974 + 0.1235C_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 0.0556C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^2 + 0.5344C_{\text{CuSO}_4} + 0.5356C_{\text{CuSO}_4}^2 + 0.1475C_{\text{Glycerol}} + 0.2029C_{\text{Glycerol}}^2 \quad (2)$$

$$\mu D_{\text{CuSO}_4} (\text{m}^2 / \text{s}) = (0.7633 + 0.00511C_{\text{H}_2\text{SO}_4} + 0.02044C_{\text{CuSO}_4} + 0.0653C_{\text{Glycerol}}) \times 10 \quad (3)$$

$$t_{\text{CuSO}_4} = (0.2633 - 0.1020C_{\text{H}_2\text{SO}_4}) C_{\text{CuSO}_4} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = C_{\text{CuSO}_4} \left(\beta_{\text{CuSO}_4} - \beta_{\text{H}_2\text{SO}_4} \frac{\Delta C_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{\Delta C_{\text{CuSO}_4}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\Delta C_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{\Delta C_{\text{CuSO}_4}} = -0.000215 + 0.113075\gamma^{1/3} + 0.85576\gamma^{2/3} - 0.50496\gamma \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{C_{\text{CuSO}_4}}{C_{\text{CuSO}_4} + C_{\text{H}_2\text{SO}_4}} \quad (7)$$

$$\beta_j = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial C_j} \right]_{T, C_k \neq j} \quad (8)$$

로 구할 수 있다.

에서 0.1571m, 높이(H)는 0.003m에서 0.138m이다.

$$h_m = \frac{(1 - t_{\text{CuSO}_4}) I_{\text{lim}}}{nFC_b} \quad (9)$$

3. 실험장치와 실험범위

그림 2는 실험장치의 개략도이다. $0.32 \times 0.30 \times 0.35\text{m}^3$ 크기의 윗면이 개방된 직육면체의 아크릴 수조 속에 황산-황산구리 수용액이 담겨 있고, 덕트를 포함한 헬리컬 코일 그리고 양극이 잠겨 있다. 음극은 구리 헬리컬 코일이 사용되었고 양극은 헬리컬 코일의 내외부에 구리이온을 보충해 주기 위해 구리봉이 사용되었다. 양극은 음극의 중앙에 위치 시켰다. 구리봉의 크기는 직경 0.003m, 길이 0.15m이다. 굴뚝 역할을 하는 덕트는 헬리컬 코일을 둘러쌌다. 덕트의 크기는 내경 0.058m 높이는 0.008~0.0151m이다. 전원공급에는 VüPower사의 DC Power supply-K1810이 사용되었고, 전압과 전류측정에는 METEX사의 DIGITAL MULTIMETER MXP-4660A가 사용되었다.

표 2는 실험범위를 나타낸다. Pr 수는 2,094로 고정하였고, Ra_D 수는 층류영역에 해당되는 4.55×10^6 로 고정하였다. 헬리컬 코일의 전체 길이는 0.0157m

4. 결과

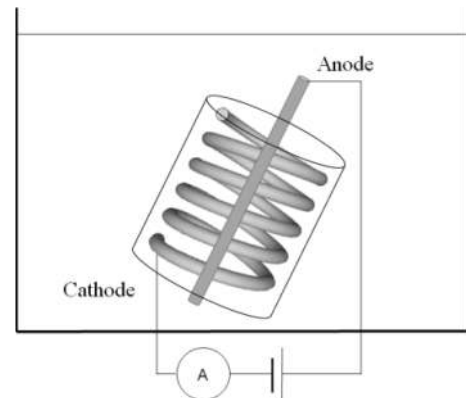


Fig. 2. Inclined helical coil circuit.

4-1. 상관식과의 비교

본 실험방법의 타당성을 검증하기 위해 턴 수가 1인 헬리컬 코일의 자연대류 열전달은 수평관의 자연대류 열전달 상관식인 McAdams 상관식과 비교하였다⁽¹⁷⁾. 비교결과 Nu_D 수의 오차는 약 1%로 나타나서 실험론이 신뢰할 만 하다고 판단하였다.

$$Nu_D = 0.53Ra_D^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_D \leq 10^7) \quad (10) \quad \text{수평으로 기울어질수록 점점 감소하였고, 헬리컬 코}$$

Table 2. Test matrix for inclined helical coil.

Ra_D	D (m)	P (m)	P/D	R (m)	Turn number, N	Inclination, θ
4.55×10^6	0.003	0.015	5	0.025	1, 2, 4, 7, 10	0, 20, 40, 60, 70, 90
		0.008	2.6			
		0.004	1.3			

CuSO₄ 0.1M, H₂SO₄ 1.5M, Pr 2,094

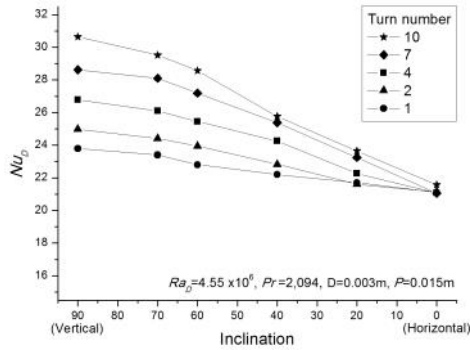


Fig. 3. Nu_D according to inclination, helical coil in a duct (P/D=5).

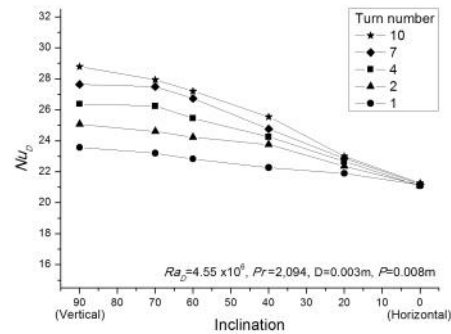


Fig. 4. Nu_D according to inclination, helical coil in a duct (P/D=2.6).

4-2. 기울기(Inclination)에 따른 Nu_D 수.

그림 3은 코일의 P/D가 5일 때, 헬리컬 코일의 기울기에 따른 Nu_D 수를 나타내었다. 모든 턴 수에서 헬리컬 코일이 수직에서 수평으로 기울어질수록 Nu_D 수는 감소하였다. 이러한 이유는 헬리컬 코일이 수직일때 튜브는 수평관의 열전달률과 유사하고, 헬리컬 코일이 기울어질 때의 열전달률은 기울어진 관의 열전달률과 유사할 것이기 때문이다. 기울어진 관에서의 열전달률은 수평에서 수직으로 갈수록 감소한다⁽⁷⁾.

헬리컬 코일이 수직일 때($\theta=90^\circ$), Nu_D 수는 턴 수의 증가와 함께 증가했다. 그러나 Heo⁽¹⁸⁾ 등의 연구에서는 수직 헬리컬 코일의 P/D가 5일 때, 코일 사이의 간격이 멀어 플룸에 의한 속도 효과를 받지 않았기 때문에 턴 수의 증가에 따른 영향이 나타나지 않았다. 그러나 본 실험에서 P/D가 5일 때 턴 수가 증가함에 따라 Nu_D 수가 증가한 이유는 다음과 같다. 첫째, 덕트에 의해 상승하는 플룸이 퍼지는 현상이 약화되어 속도 효과가 발생하였기 때문이라 판단된다. 둘째, 턴 수가 증가한 만큼 덕트 길이가 증가하여, 덕트에 의한 굴뚝 효과가 강화되었다고 판단된다.

턴 수에 따른 Nu_D 수의 증가폭은 헬리컬 코일이

일이 수평일 때 턴 수에 따른 영향이 거의 없었다. 이는 헬리컬 코일이 수평($\theta=0^\circ$)일 경우, 코일들이 수평 방향에 배열되어 수직으로 상승하는 플룸이 다른 코일에 영향을 주지 않기 때문이다.

그림 4는 P/D가 2.6일 때 헬리컬 코일의 기울기에 따른 Nu_D 수를 나타낸다. 기울기에 따른 Nu_D 수는 P/D가 5일 경우와 유사하였다. Heo 등⁽¹⁸⁾에 따르면 헬리컬 코일이 수직일 때, 속도 효과는 P/D=5 일 경우 보다 P/D가 3일 때 더 강하게 발생하였다. 그러나 본 실험에서 헬리컬 코일의 P/D가 2.6 일 때 P/D가 5 일 때 보다 전체적으로 턴 수에 따른 Nu_D 수의 증가폭은 감소하였다. 이는 P/D가 2.6에 가까워지면서 속도 효과는 강해지는 반면, P/D의 감소로 덕트의 길이가 짧아져 굴뚝 효과는 감소했기 때문이라 판단된다. 즉, 덕트 안의 헬리컬 코일에서는 속도 효과보다 굴뚝 효과가 더 크게 작용함을 확인하였다.

그림 5는 코일의 P/D가 1.3일 때 헬리컬 코일의 기울기에 따른 Nu_D 수를 나타낸 그래프다. 턴 수가 1 일 경우에는 앞의 실험결과와 유사하였다. 그러나 다른 턴 수의 결과는 이전 실험결과와 다른 경향을 나타내었다.

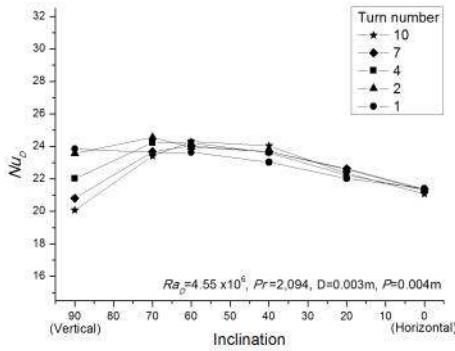


Fig. 5. Nu_D according to inclination, helical coil in a duct ($P/D=1.3$).

수직 헬리컬 코일의 경우, 턴 수가 1일 때 Nu_D 수가 가장 크고, 턴 수가 증가 할수록 점점 Nu_D 수가 작아진다. 이는 코일의 P/D 가 1.3일 때 상단 코일과 하단 코일이 매우 근접하여 예열 효과가 지배적인 영역이기 때문에 턴 수의 증가가 오히려 Nu_D 수를 감소시킨 것으로 판단된다.⁽¹⁸⁾

기울기가 90°에서 0로 감소하면서 Nu_D 수는 첨두치(Peak point)를 갖는다. 이는 본 실험의 Pr 수는 2,094로 열경계층이 속도경계층에 비해 매우 얇아서 수직일 때는 예열 효과가 지배적이지만, 기울어지면서 열경계층의 영향에서 벗어나 속도 효과가 지배적이기 때문이다.⁽⁹⁾

Nu_D 수의 첨두치 이후에 기울기가 감소함에 따라 속도 경계층의 영역에서 벗어나게 되면서 Nu_D 수는 감소했다.

5. 결론

본 연구에서 기울어진 덕트 내 헬리컬 코일에서의 자연대류 열전달 현상을 실험적으로 연구하였다. 유사성의 원리를 이용하여 열전달 실험을 물질전달 실험으로 대체하였고, 전기도금계의 한계전류 기법을 채택하였다. 실험은 Ra_D 수 4.55×10^6 에서, P/D 를 1.3~5, 헬리컬 코일의 기울기를 0~90°, 턴 수를 1~10 까지 변화시키며 수행하였다.

헬리컬 코일의 턴 수가 1일 때, 측정된 Nu_D 수는 McAdams의 수평관 자연대류 열전달 상관식과 거의 일치하였다.

기울어진 덕트 내 헬리컬 코일의 자연대류 열전달

은 속도 효과, 굴뚝 효과, 예열 효과의 복합적인 영향을 받았다.

P/D 가 5 일 때, 속도 효과와 굴뚝 효과에 의해 턴 수가 증가함에 따라 열전달률도 증가하였고 기울어짐에 따라 열전달률은 감소하였다. P/D 가 2.6 일 때, P/D 가 5일 때와 거의 유사한 경향을 나타내었으나, 굴뚝 효과의 감소로 열전달률은 전체적으로 감소하였다. P/D 가 1.3일 때 수직 헬리컬 코일에서는 예열 효과가 지배적이었고, Pr 수에 따른 경계층 조건에 의해, 기울어짐에 따라 열경계층을 벗어나 속도 경계층에 영향을 받으며 열전달률이 첨두값을 나타냈다.

본 연구를 통해 기울어진 헬리컬 코일 내 자연대류에 대한 피치와 턴에 따른 열전달 영향을 현상론적 관점으로 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부와 한국연구재단이 지원한 원자력대학생 논문연구사업(NtUss)의 지원에 의해 수행되었습니다.

기호

C_b	Cupric ion concentration in the bulk [mol/m ³]
D	Diameter of the helical coil [m]
D_m	Diffusivity [m ² /s]
g	Gravitational acceleration, 9.8 [m/s ²]
H	Height of the helical coil [m]
h_h	Heat transfer coefficient [W/m ² K]
h_m	Mass transfer coefficient [m/s]
k	Thermal conductivity [W/mK]
L	Total length of the helical coil [m]
N	Number of turns of the helical coil
Nu_D	Nusselt number based on the diameter [h _h D/k]
P	Pitch of the helical coil [m]
Pr	Prandtl number [v/α]
R	Winding radius of the helical coil [m]
Ra_D	Rayleigh number based on the diameter [gβΔTD ³ /αv]
S_h	Sherwood number [h _m D/D _m]

T	Temperature [K]
tn	Transference number
U _x	Uncertainty of x

Greek symbols

α	Thermal diffusivity [m^2/s]
β	Volume expansion coefficient [$1/\text{K}$]
θ	Angular position of cylinder (°)
μ	Viscosity [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]
ν	Kinematic viscosity [m^2/s]
ρ	Density [kg/m^3]

References

- J. S. Jayakumara,b*, S. M. Mahajaia., J. C. mandala., P. K. Vijayanb., Rohidas Bhoia., Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers, *Chemical engineering research and design*, 2008, 86, 221-232.
- D.G. Prabhanjan., G. S. V. Raghavan. and T. J. Rennie., COMPARISON OF HEAT TRANSFER RATES BETWEEN A STRAIGHT TUBE HEAT EXCHANGER AND A HELICALLY COILED HEAT EXCHANGER, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2002, 29, 185-191.
- Vimal kumar., Supreet Saini., Manish Sharma., K. D. P. Nigam*, Pressure drop and heat transfer study in tube-in-tube helical heat exchanger, *Chemical Engineering Science*, 2006, 61, 4403-4416
- G. YANG., Z. F. DONG. and M. A. EBADIAN., Laminar forced convection in a helicoidal pipe with finite pitch, 1995, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38, 853–862.
- T. H. Ko., Thermodynamic analysis of optimal curvature ratio for fully developed laminar forced convection in a helical coiled tube with uniform heat flux, *International Journal of Thermal Sciences*, 2006, 45, 729–737.
- T. H. Ko., Numerical Investigation of Laminar Forced Convection and Entropy Generation in a Helical Coil with Constant Wall Heat Flux, *Numerical Heat Transfer*, 2006, 49, 257-278.
- Heo, J. H. and Chung, B. J., Natural Convection Heat Transfer on the Outer Surface of Inclined Cylinders, *Chemical Engineering Science*, 2012, 73, 366-372
- Sparrow, E. M. and Niethammer, J.E., Effect of Vertical Separation Distance and Cylinder-to-Cylinder Temperature Imbalance on Natural Convection for a Pair of Horizontal Cylinders, *Trans. of the ASME*, 1981, 103, 638-644
- A. Auletta, O. Manca, B. Morrone, V. Naso., "Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, 44, 4345-4357.
- S. E. Haaland and E. M. Sparrow., "Solutions for the channel plume and the parallel-walled chimney," *Numerical Heat Transfer*, 1983, 6, 155-172.
- Levich. V. G., *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962.
- Selman, J.R., Tobias, C. W., Mass Transfer Measurement by the Limiting Current Technique, *Adv. Chem. Eng.*, 1978, 10, 211-318.
- Fenech, E.J., Tobias, C.W., *Electrochim. Acta*, 1960 2, 311
- Ko, S. H., Moon, K. W. and Chung, B. J., "Applications of Electroplating Method for Heat Transfer Studies Using Analogy Concept," *Nuclear Engineering and Technology*, 2006, 38, 251-258.
- Kang, K. u. and Chung, B. J., "The Effects of the Anode Size and Position on the Limiting Currents of Natural Convection Mass Transfer Experiments of Natural Convection Mass Transfer Experiments in a Vertical Pipe," *Trans. of the KSME(B)*, 2010, 34, 1-8.

16. Fenech, E. J. and Tobias, C. W., "Mass transfer by free convection at horizontal electrode", *Electrochimica Acta*, 1960, 2, 311-325
17. McAdams WH. *Heat Transmission*, 3rd edn. McGraw-Hill, NY, 1954, 175-177
18. Heo, J. H. and Chung, B, J., Influence of Helical Tube Dimensions on Open Channel Natural Convection Heat Transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55, 2829-2834