

수평 평활관 내부에 삽입한 와이어코일 인서트에 대한 전열성능평가

남삼철 · 이주동 · 이상천*

영남대학교 대학원 기계공학과, *영남대학교 기계공학부

Evaluation of Heat Transfer Enhancement Performance for Wire Coil Inserts in Horizontal Smooth Tubes

S. C. Nam, J. D. Lee and S. C. Lee*

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Yeungnam University

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요 약

본 연구는 다양한 각도를 가지는 와이어코일을 사용하여 관내 단상 열전달 촉진 및 압력강하 특성 실험을 수행하였다. 작동유체는 순수 물과 에틸렌글리콜을 체적비율로 50% 혼합하여 사용하였으며, 시험부 관 지름은 11 mm와 13.88 mm이고, 시험부 길이는 760 mm를 사용하였다. 평활관과 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관에 대한 관내 열전달계수와 마찰계수는 실험에서 측정된 온도, 유량, 압력강하 값을 기초로 구하였다. 와이어코일에 대한 거칠기표면해석을 수행하였으며, 그 결과를 거칠기 레이놀즈수에 대한 운동량전송 거칠기함수와 열전달 거칠기함수로 표현하였으며 이에 대한 상관식을 제시하였다. 이 상관식들은 거칠기 레이놀즈수, 코일 각도, 프란틀수의 함수로 표현하였다.

Abstract — An experiment was carried out to evaluate performance of heat transfer and fluid flow with the pure water and ethylene-glycol using various wire coil inserts under horizontal single phase conditions. The tube inner diameters were 11 mm and 13.88 mm, respectively and the test tube length was 760 mm. Heat transfer coefficients for both plain and enhanced test tubes were calculated from measurements of temperatures, flowrates and pressure drops. Rough surface analysis was carried out to find characteristics of heat transfer and pressure drop for the various wire coil inserts. Correlations in a power-law relationship of the momentum transfer roughness function, the roughness Reynolds number and the helix angle for pressure drop were proposed the rough surface tubes.

1. 서 론

열전달 촉진기술은 에너지의 발생 및 전달 장치에서 고온유체와 저온유체 사이의 열교환 효율을 향상시키기 위한 것으로 지난 20년 동안 급속한 발전을 이루어 왔다. 열전달 촉진기술에 대한 연구는 Bergles¹⁾에 의하여 상세하게 정리되어 있는데 그는 20여가지로 분류하고, 유동력법(active technique)과 무동력법(passive technique)으로 구분 하였다. 유동력법은 외부동력을 사용하여 열전달을 촉진시키는 기술로, 대표적인 방법으로는 표면진동(surface vibration), 유체진동(fluid vibration), 전기장

(electrostatic fields), 분사(injection), 흡입(suction), 충돌제트(jet impingement) 등과 같은 기술들이 있다. 무동력법은 외부동력을 사용하지 않고 열전달을 촉진시키는 기술로 거친 전열면을 사용하거나 유동장 내부에 물체를 삽입하여 열전달을 증진시키는 기술이다. 무동력법에 의한 열전달 촉진 원리는 기본적으로 열전달계수나 열전달면적을 증가시키는 방법을 채택하고 있는데 이는 대류 열전달 계산식으로 설명될 수 있다.

$$Q=hA(T_H-T_L) \quad (1)$$

여기에서 Q는 열교환량, h는 대류 열전달계수, A는 열

전달 면적, T_{in} 는 고온유체온도, T_{out} 는 저온유체온도를 의미한다. 식 (1)에서 주어진 온도차에서 열교환량을 증가시키기 위하여서는 다음의 세 가지 방법을 생각할 수 있다. 첫째 열전달계수를 증가시키는 방법, 둘째 열전달면적을 증대시키는 방법, 셋째 열전달계수와 열전달면적을 동시에 증가시키는 방법이 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 개발되거나 현재 사용되는 방법 가운데 표면처리 기법, 변위삽입기법, 첨가제법은 첫 번째 방법이며, 거친표면기법, 확장표면기법은 거칠기의 정도와 핀의 높이에 따라 두 번째 또는 세 번째 방법으로 분류될 수 있다.

Fig. 1은 평활관과 거친벽면을 갖는 열전달촉진관에 대한 기본적인 열경계층을 도시한 그림이다. 평활관은 열경계층이 점성저층(viscous sublayer), 천이층(buffer layer), 난류층(turbulent core)으로 나누어 형성되며, 이 가운데 점성저층은 얇은 두께를 가지고 있으나 인접한 벽면에 의해 유체입자의 활동이 억제된다. 이는 벽면과 주 유동사이의 급격한 온도구배를 갖게 하고 열저항이 증가되어 궁극적으로 열전달을 방해하는 역할을 한다. 열전달촉진관은 거친면이 점성저층과 천이층에 걸쳐 있기 때문에 점성저층을 파괴시켜야만 열전달을 촉진시킬 수 있다. 이 연구에서 사용한 와이어코일 삽입법은 관벽근처의 점성저층을 파괴하며 선회유동(swirl flow)을 발생시켜 유체의 혼합을 원활히 하기 때문에 열저항을 감소시키는 역할을 한다. 이 방법에서 주요인자는 와이어코일 굵기, 와이어코일 직경, 비틀림각도 또는 코일각도(helix angle), 그리고 피치인제, 광범위한 범위의 이들 인자에 대한 열전달 및 압력강하 특성치에 관한 상관식이 제공되는 것이 이 기술의 다양한 활용을 위하여 중요하다.

와이어코일 삽입법은 제작이 간편하고, 비용이 저렴하며 관 부차이 용이하기 때문에 널리 사용되고 있다. 이에 관한 주요 연구로는 Kummer와 Judd^[2], Sethumadhavan과 Raja Rao^[3], Uttarwar와 Raja Rao^[4], Nag와 Raja

Rao^[5], Chiou^[6], Mehmet 등^[7], Prasad와 Shen^[8] 등이 있다. Kummer와 Judd^[2]는 스텐레스 강관 내부에 표면을 코팅한 와이어코일(각도: 50°)을 삽입하여 순수 물에 대한 열전달 실험을 수행하였으며 열전달 상관식을 제시하였다. Sethumadhavan와 Raja Rao^[3]는 관내에 헬리컬 와이어 코일을 관내부에 삽입하여 순수한 물과 에틸렌 글리콜 수용액(체적비 50%)에 대하여 열전달 및 압력강하 특성실험을 수행하였다. 실험범위는 레이놀즈수 범위는 4,000~100,000이다. 그 결과, 스탠튼수(Stanton number)가 최고 150%까지 증가하였고, 높은 프란틀수를 가진 작동유체일수록 큰 비틀림각도(helix angle)에서 열전달이 향상된다는 사실을 제시하였다. Uttarwar와 Raja Rao^[4]은 관내에 코일각도가 32°, 46°, 61°, 76°인 와이어코일을 삽입하고 층류 유동에서 Servotherm Oil에 대하여 열전달 특성실험을 수행하였다. 그 결과 와이어코일 인서트를 삽입하지 않은 경우보다 최고 400%까지 열전달 촉진이 이루어지며, 또한 비틀림각도(helix angle)가 클수록 열전달 효과가 크다고 보고하였다. Nag와 Raja Rao^[5]는 코일각도가 51°, 66°, 79°인 리본코일(ribbon coil)을 삽입하여 순수한 물과 40% 글리세롤에 대하여 열전달 및 압력강하 특성실험을 수행하여 평활관에 비해 최고 200% 이상 열전달촉진 효과가 있다고 보고하였다. Chiou^[6]는 코일 굵기와 직경이 다른 16가지 와이어코일을 열교환기 내부에 삽입하여 레이놀즈수가 1,000~8,000 범위에서 열전달 및 압력강하 특성실험을 수행하였다. 그 결과, 레이놀즈수가 1,200 이하에서는 와이어코일 삽입관은 평활관에 비해 약 300% 정도 열전달촉진효과가 발생하였고, 레이놀즈수가 증가할수록 열전달촉진효과가 감소하며 레이놀즈수가 6,000 이상인 경우는 열전달촉진효과가 150%로 일정하다고 보고하였다. Mehmet 등^[7]은 수평관에 와이어코일을 삽입하여 난류영역을 갖는 공기에 대해 열전달 및 압력강하 특성에 대한 실험적 연구

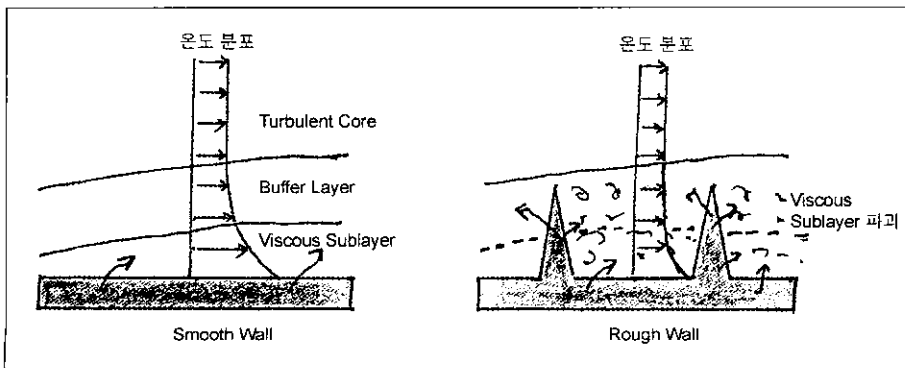


Fig. 1. Thermal boundary layer for smooth wall and rough wall.

Table 1. A summary of conditions and correlations.

Authors	Medium	Reynolds number	Tube type	Phase	Correlation eqn.
Kummar, R. & Judd, R. L. (1970)	Water	6,000-100,000	Wire Coil Inserts	Single Phase	$Nu_d = 0.175 \left(\frac{p}{d_i}\right)^{-0.35} Re_d^{0.7} Pr^{\frac{1}{3}}$
Sethumadhavan, R. & Rao, M. R. (1983)	Water 50% Glycerol	8,000-80,000 3,000-15,000	Wire Coil Inserts	Single Phase	$R(h^*)(h^2/p D_{eq})^{0.33} = 0.40 (h^*)^{0.164}$ $G(h^*, Pr)(Pr^{-0.35}) = 8.6 (h^*)^{0.33}$ for $25 < h^* < 180$
Uttarwar, S. B. & Rao, M. R. (1985)	Servotherm Oil	30-700	Wire Coil Inserts	Single Phase	$Nu = 1.65 \tan(\alpha) (Re_{De})^{0.25(\tan(\alpha)-0.38)} Pr^{0.35} \phi$
Nag, S. & Rao, M. R. (1987)	Water	6,000-40,000	Ribbon Coil Inserts	Single Phase	$Nu = 0.031 Re^{0.8} Pr^{0.3} (\alpha = 51^\circ)$ $Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.3} (\alpha = 66^\circ)$ $Nu = 0.050 Re^{0.8} Pr^{0.3} (\alpha = 79^\circ)$
Mehmet, E. A. et al. (1994)	Air	2,000-60,000	Wire Coil Inserts	Single Phase	Not Available (Graphic Form)

를 수행하였다. 그 결과, 두 가지 종류의 와이어코일에 대한 열전달 특성은 모두 평활관에 비해 약 100%의 열전달이 증가되었고, 압력강하는 벽면과 밀착되어 삽입한 와이어코일(wall-attached wire coil)인 경우, 평활관에 비해 약 400% 증가하였고, 벽면과 밀착되지 않게 삽입한 와이어코일(displaced wire coil)은 800% 증가하였다. 또, 코일 피치가 증가할 수록 열전달과 압력강하가 감소된다고 발표하였다. Prasad와 Shen⁸⁾은 와이어코일에 대한 열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험적 결과를 토대로 엑서지 해석(exergy analysis)을 이용해서 열전달촉진에 의한 성능평가를 시도하였다. 위에서 언급한 연구자들에 대한 실험조건과 상관식들을 Table 1에 요약하였다.

Table 1에 제시된 열전달 상관식들은 누셀트수를 레이놀즈수, 프란틀수, 와이어코일의 피치 또는 비틀림각도를 사용하여 제안하였다. 특히 레이놀즈수에 사용된 수력직경은 단순히 관내 직경을 사용하였는데, 이는 와이어코일을 삽입한 경우에 수력직경이 달라지는 점을 고려하지 않았음을 알 수 있다. 따라서, 이 상관식들은 열전달촉진관에 대한 수력직경만을 기하학적 인자로 고려하였기 때문에 동일한 실험조건에 국한되어 적용 가능하다는 점이 문제점으로 지적될 수 있다. 이 점을 해결하기 위하여 운동량전달과 열전달의 상사성을 토대로 마찰상사법칙(friction similarity law)과 열전달상사법칙(heat transfer similarity law)을 적용한 거친표면해석(rough surface analysis)을 시도하고자 한다. 이 해석을 통하여 코일의 비틀림 각도, 코일높이(또는 코일직경), 수력직경, 열전달계수, 레이놀즈수, 마찰계수, 거칠기 레이놀즈수 등으로 표현되는 열전달 및 압력강하 상관식들을 얻을 수 있다. 이 상관식들은 유동조건과 더불어 실제 열전달촉진관과 근접한 기하학적 인자를 포함하고 있어 와이어코일 삽입법의 활용을 보다 확장할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 다양한 각도와 코일직경을 갖는 와이

어코일에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 실험적 방법으로 수행하고 그 실험결과를 토대로 거친표면해석을 수행하여, 열전달 및 마찰계수에 관한 상관식을 제시하였다. 이들 상관식들은 열전달촉진관의 기하학적 형상과 유동조건을 동시에 고려한 상관식으로서 코일형태의 다양한 열전달촉진관에 적용될 수 있으리라 기대된다.

2. 이론적 배경

거친표면에 대한 압력강하와 열전달 특성을 예측하기 위해서는 거친표면을 갖는 열전달촉진관의 기하학적 형상과 유동조건을 인자를 변수로 하는 상관식이 필요하다. 거친표면에 대한 해석은 크게 마찰상사법칙과 열전달상사법칙으로 나눌 수 있다. 먼저, 마찰상사법칙은 Nikuradse⁹⁾에 의해 개발되었고, Schlichting¹⁰⁾에 의해 발전되었다.

마찰상사법칙은 관 내부를 내부영역과 외부영역으로 나누어 적용할 수 있다. 내부영역의 경우, 점성과 벽면거칠기의 영향이 큰 영역으로 속도분포는 벽면에서 거리(y), 전단응력(τ), 점성계수(μ), 거칠기 높이(h_r)와 같은 국소 조건에 따라 변화하며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$u_1^+ = \frac{u}{u^*} = F_1 \left[\frac{yu^*}{\gamma} \right] = F_1[y^*] \quad (2)$$

여기서, u_1^+ 는 내부영역에서 무차원 속도이며, u^* 는 전단속도(shear velocity), y^* 는 무차원 벽면 축방향 거리를 나타낸다. 따라서, 식 (2)는 내부영역에서의 속도분포는 벽면에서 축방향으로 떨어진 거리의 함수임을 의미한다.

전단속도는 평균 벽면전단응력(average wall shear stress)과 유체 평균밀도의 함수로 표현되며, 식 (3)과 같다. 평균 벽면전단응력은 원관인 경우, 힘 평형식에서 식

(4)와 같이 표현된다.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3)$$

$$\tau_0 = -\left(\frac{D_i}{4p}\right)\left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (4)$$

한편, 외부영역은 표면에 대한 거칠기와 관 내부영역의 점성에 의한 마찰을 무시할 수 있는 영역으로, 속도 분포(u_z^*)는 식 (5)와 같이 벽면으로부터 거리(y)와 거칠기(h_R)의 함수로 표현된다.

$$u_z^* = \left(\frac{u_{\max} - u}{u^*}\right) = F_z \left[\frac{y}{h_R}\right] \quad (5)$$

식 (2)와 (5)를 연립해서 풀면, 난류영향이 지배적인 벽면근처영역에 대한 속도 분포식을 얻을 수 있는데, 식 (6)과 같다.

$$u^* = 2.5 \ln(y/h) + R(h^*) \quad (6)$$

거친표면을 갖는 관내부의 속도분포를 알면 유체의 난류유동에 대한 마찰계수는 식 (6)을 관 단면에 대해 적분을 하면 얻을 수 있다. 따라서, 거친표면에 대한 마찰상사법칙을 적용하면 식 (7)과 같이 나타난다¹¹⁾.

$$R(h^*) = \sqrt{\left(\frac{2}{f}\right)} + 25 \ln\left(\frac{2h_R}{D_{vd}}\right) + 3.75 \quad (7)$$

식 (7)에서 $R(h^*)$ 는 관 표면의 기하학적 인자와 유체의 점성에 의한 마찰계수의 함수로 표현되는데 이를 운동량전송 거칠기함수(momentum transfer roughness function)라고 한다. 또, h 는 거칠기 레이놀즈수(roughness Reynolds number)로, Hinze¹²⁾와 Schlichting¹³⁾은 거친표면에서 속도분포는 거칠기 레이놀즈수와 관 형상의 함수라고 제안하였다. 또, Nikuradse⁹⁾는 모래알(sand-grain) 거친표면에서 거칠기 레이놀즈수가 70이하인 경우, 상수값이 8.48을 갖는다고 보고한 바 있다. 한편, 거칠기 레이놀즈수는 관 거칠기, 수력직경, 레이놀즈수와 마찰계수의 함수로 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$h^* = \left(\frac{h_R}{D_{vd}}\right) \cdot \text{Re} \cdot \sqrt{\left(\frac{f}{2}\right)} \quad (8)$$

거칠기 레이놀즈수에서 Hinze¹²⁾와 Schlichting¹³⁾은 관 내경을 수력직경으로 사용하였는데, 이 연구에서는 단위 체적당 차지하는 유체의 부피를 측정하여 코일이 차지하는 부피를 제외한 체적수력직경(volumetric hydraulic diameter)을 사용하였다. 이는 와이어코일의 각도, 피치, 코일직경 변화를 갖는 열전달촉진관의 기하학적 조건을 잘 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 만약 수력직경

으로 관내경을 사용하는 경우는 코일각도, 코일피치, 코일직경이 변화에 대해서 항상 동일한 값을 가지게 되어, 궁극적으로 열전달촉진관의 기하학적 특성을 잘 반영할 수 없다.

Dipprey와 Sabersky¹¹⁾은 거친표면에서 대해서 속도분포와 온도분포를 벽면상사성법칙(wall similarity law)을 기초로 열전달 상사법칙으로 개발하여 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$G(h^*) = \frac{(f/2St-1)}{\sqrt{f/2}} + R(h^*) \quad (9)$$

여기에서 $G(h^*)$ 는 열전달 거칠기함수(heat transfer roughness function)이며 St 는 스탠튼수(Stanton number)이다. 이들은 식 (9)를 이용하여 거친 표면 위의 난류유동에 대한 열전달 실험을 수행하여 식 (10)과 같은 상관식을 제안하였다.

$$\frac{(f/2St-1)}{\sqrt{f/2}} + 8.48 = 5.19(\text{Pr})^{0.44}(h^*)^{0.20} \quad (10)$$

for $0.0024 < e/D < 0.044$, $1.2 < \text{Pr} < 5.94$, $h^* > 70$

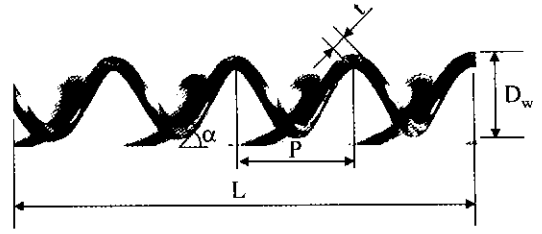
이 식은 마찰계수를 알면 운동량전달과 열전달의 상사성을 이용하여 열전달계수를 예측할 수 있는 결과를 보여주고 있다. 그 이후 이러한 거친표면해석은 무동력 열전달촉진기술의 대표적인 방법인 거친표면기법과 확장표면기법 등에 시도된 바가 있다. Webb 등¹⁴⁾은 반복되는 주름(repeated-rib)을 가진 열전달 촉진표면에, Sethumadhaven와 Rao¹⁵⁾는 와이어코일을 가진 원관내 난류유동에 이 방법을 적용하여 열전달 상관식을 발표한 바가 있다.

3. 실험

와이어코일에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 파악하기 위해 실험장치를 직접 제작하였는데, Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타냈다. 실험장치는 시험부, 냉각기(chiller), 전기보일러로 구성하였다. 시험부는 2중관(double pipe) 형태로 길이가 780 mm이고, 저온의 유체와 고온의 유체가 각각 내부관과 외부관으로 유입시켰으며, 상호 열교환을 극대화시키기 위해 대항류(count flow)를 택하였다. 작동유체는 순수 물과 에틸렌글리콜을 체적비율로 50% 혼합한 수용액으로 주로 브라인(brine)으로 많이 사용되는 유체이다. 작동유체의 입구 온도는 냉각기와 보일러를 사용하여 조절하여 사용하였으며, 저온의 에틸렌글리콜 수용액 입구온도 범위는 $-13^\circ\text{C} \sim -18^\circ\text{C}$ 이며, 프란틀수 범위는 35~42이다. 온도측정은 T형 열

전대를 사용하였으며, 측정지점은 각 유체의 입·출구 및 벽면이다. 특히, 벽면의 경우 측정의 정확성을 위해 측정지점의 원주를 따라 3개의 열전대를 부착하여 평균한 값을 사용하였다. 유량은 내부관과 외부관의 입구에 목직경비(ratio of throat diameter, $\beta=D_2/D_1$)가 0.5와 0.6인 칼날형 오리피스(sharp-edged orifice)로 측정하였는데, 보정실험(calibration)을 실시하여 레이놀즈수에 대한 송출계수를 구하여 사용하였다. 또, 미세한 유량조절을 위해 유량조절밸브와 바이패스 밸브를 설치하였다. 압력은 차압(differential pressure)과 절대압력을 측정하였는데, 주로 마찰계수와 유체의 열역학적 물성치를 구하는데 사용하였다. 측정한 온도, 유량, 압력의 실험자료들은 Fluke사의 NetDAQ 2640A 데이터로거로 획득하였으며 표본 추출횟수(sampling frequency)는 100 Hz이다. 열전달계수와 마찰계수의 계산은 자체 개발한 소프트웨어를 이용하였다. 실험에서 측정된 주요인자인 온도, 유량, 압력은 열전달계수, 마찰계수, 열역학적 물성치를 구하는데 사용하였다. 한편, 외부 열에 의한 열손실을 방지하기 위해 실험장치를 단열재로 단열처리 하였다. 측정한 온도, 압력, 유량의 불확실성은 0.7°C, ±0.5%, ±2%이다.

실험에 사용된 와이어코일의 기하학적 형상과 치수는 Fig. 3에 자세하게 나타냈다. 그리고, 실험은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 평환관의 내경이 11 mm와 13.88 mm이며, 와이어코일의 직경은 2 mm, 3 mm이며, 코일각도는 53°, 60°, 64°, 66°, 69°, 72°, 73°, 79°를 사용하였다.



Tube Type	D _w (mm)	D _{vd} (mm)	t (mm)	p (mm)	α (deg)	p/d _i
S ₁ (Plain)	11.0	11.00	-	-	-	-
S ₂ (Plain)	13.88	13.88	-	-	-	-
W ₁	11.0	11.00	2	20	53	1.82
W ₂	11.0	11.00	2	15	64	1.36
W ₃	11.0	10.70	2	10	72	0.91
W ₄	11.0	10.40	2	6	79	0.55
W ₅	13.88	13.70	3	23	60	1.66
W ₆	13.88	13.58	3	18	66	1.30
W ₇	13.88	13.49	3	15	69	1.08
W ₈	13.88	13.26	3	12	73	0.86

Fig. 3. Schematic Diagram and Geometric Properties for the Wire Coil Inserts.

본 실험에서 사용된 작동유체의 물성치는 ASHRAE Handbook¹⁵에서 제시한 자료를 사용하였으며, 열평형오차(heat balance error)가 ±5.0% 범위내의 실험자료를 기준으로 열전달계수와 마찰계수를 계산하였다. 2중관 열교환기의 내부 열전달계수는 식(11)을 사용하여 계산하였다.

$$h = \left[\frac{\pi D_i \Delta L (T_w - T_f)}{Q} \frac{D_i}{2k_w} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

여기서 T_w 는 평균벽면온도이고, T_f 는 내부 작동유체의 평균온도이다. 열교환량, Q 는 에너지평형식에서 계산할 수 있는데 식 (12)와 같이 주어진다.

$$Q = G_h \cdot C_{ph} \cdot (T_{ht,i} - T_{ht,o}) \quad (12)$$

T_{ht} 와 G_h 는 외부관 에틸렌글리콜 수용액의 평균온도와 질량유량(kg/s)이며, 아래첨자 i와 o는 입, 출구를 의미한다. 그리고 마찰계수, f 는 Darcy 마찰계수로 사용하였는데, 식 (13)와 같이 나타낸다.

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right)} \quad (13)$$

4. 실험결과 및 토론

실험을 통해 획득한 온도, 유량, 압력에 대한 실험자

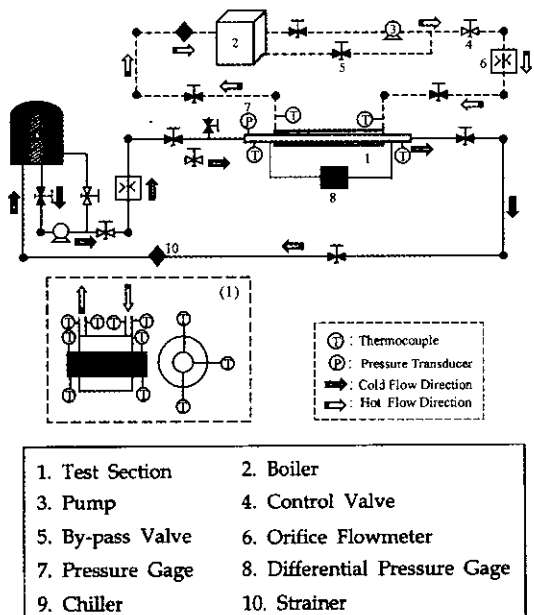


Fig. 2. Schematic Diagram of Experimental Equipment.

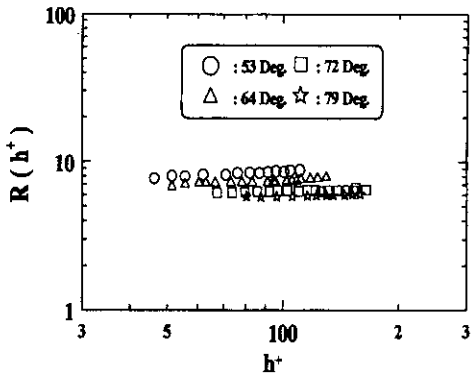


Fig. 4. Variation of $R(h^+)$ versus h^+ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (11 mm)

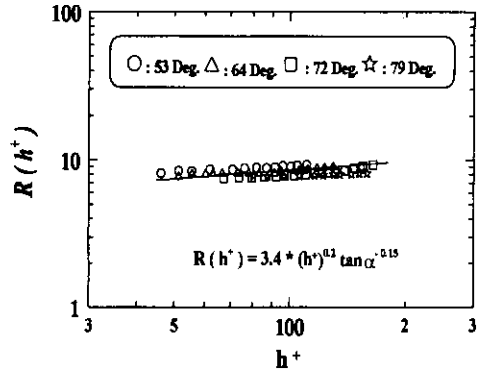


Fig. 6. Variation of $[R(h^+) \cdot \tan \alpha^{0.15}]$ with h^+ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (11 mm)

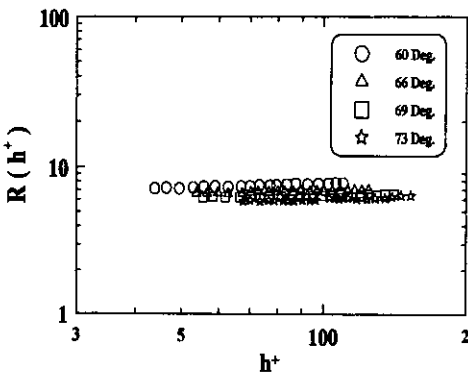


Fig. 5. Variation of $R(h^+)$ versus h^+ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (13.88 mm)

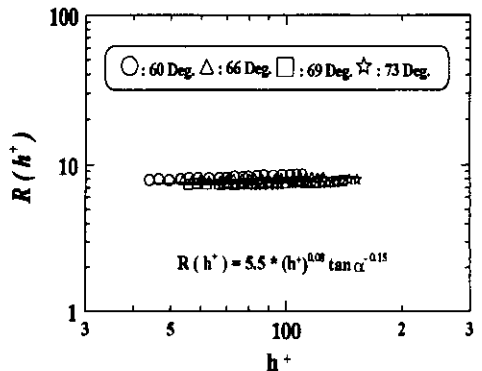


Fig. 7. Variation of $[R(h^+) \cdot \tan \alpha^{0.15}]$ with h^+ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (13.88 mm)

료와 열역학적 물성치를 기초로 평활관과 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관에 대한 거친표면해석을 수행하였다. 그 결과, 와이어코일의 거칠기 레이놀즈수에 대한 운동량전송 거칠기함수와 열전달 거칠기함수를 구하여, 열전달 및 압력강하 특성을 규명하였고 상관식을 제시하였다.

Figs. 4-5는 열전달촉진관 내경이 11 mm와 13.88 mm 인 경우에, 코일각도가 다른 4가지 종류의 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관에 대한 압력강하특성을 거칠기 레이놀즈수와 운동량전송 거칠기함수를 도시한 그림이다. 운동량전송 거칠기함수는 마찰계수, 코일직경, 체적수력직경의 함수로 표현되는데, 이는 와이어코일의 기하학적 변화에 따른 압력강하 특성을 잘 나타낼 수 있다. 거칠기 레이놀즈수는 레이놀즈수, 마찰계수, 와이어코일 직경과 체적수력직경 비로 표현된다. 따라서, 전반적으로 거칠기 레이놀즈수에 대해서 운동량전송 거칠기함수가 증가하는 경향을 나타냈는데, 이는 레이놀즈수가 증가함에 따라 마찰계수가 감소하였기 때문이다. Fig. 4와 5에서 거칠기 레이놀즈수에 대한 운동량전송 거칠기함

수는 와이어코일의 각도가 53°와 60°에서 가장 높게 나타났는데, 이는 와이어코일의 피치가 20 mm와 23 mm로 다른 와이어코일에 비해 피치가 큰 경우로, 관내 단위 체적당 코일이 차지하는 체적이 적어 관내 마찰저항 발생을 감소시켰고, 이는 궁극적으로 낮은 마찰계수를 갖게 하였기 때문이다.

본 실험결과들을 Sethumadhaven와 Raja Rao^[3], Withers^[16]가 보고한 내용과 비교해 볼 때, 정성적으로 매우 유사함을 알 수 있었으며 또한 와이어코일의 각도와 피치가 와이어코일의 압력강하 특성에 중요한 인자라는 것을 밝혀 내었다.

Gee와 Webb^[17]은 와이어코일을 삽입한 열전달촉진관에서 운동량전송 거칠기함수가 $\tan \alpha$ 에 비례한다고 보고하였는데, 본 연구에서는 운동량전송 거칠기함수가 $\tan \alpha^{0.15}$ 에 비례한다는 사실을 실험결과로 알 수 있었다. 따라서, 본 해석결과를 기초로 운동량전송 거칠기함수에 대한 상관식을 식 (14) 및 (15)와 같이 제안하였다. 식 (14) 및 (15)는 거칠기 레이놀즈수와 와이어코일의 각도

의 지수승 형태로 표현하였는데, 평환관의 내경이 11 mm 와 13.88 mm인 경우로 대해서 제시하였다. Figs. 6~7에서 본 실험자료와 제안한 상관식을 함께 비교하여 나타냈는데 비교적 잘 일치하였다.

$$R(h^*) = 3.4(h^*)^{0.2} \tan \alpha^{-0.15} \quad \text{for } (53^\circ \leq \alpha \leq 79^\circ, 11 \text{ mm}) \quad (14)$$

$$R(h^*) = 5.54(h^*)^{0.68} \tan \alpha^{-0.15} \quad \text{for } (60^\circ \leq \alpha \leq 73^\circ, 13.88 \text{ mm}) \quad (15)$$

Figs. 8~9는 거칠기 레이놀즈수에 대한 열전달전송 거칠기함수에 대한 그림이다. 열전달전송 거칠기함수는 대류 열전달계수, 마찰계수, 운동량전송 거칠기함수 등을 포함하고 있어, 와이어코일 삽입관의 기하학적 형상과 압력강하를 동시에 고려한 열전달 특성을 나타낸다. 따라서 열전달전송 거칠기함수는 거칠기 레이놀즈수와 코일 각도가 증가할수록 높게 나타났는데, 이는 코일 삽입관의 표면거칠기, 체적수력직경, 피치, 코일각도를 함께 고려한 경우의 열전달특성을 의미한다. 일반적으로 열전달

촉진기술을 적용하면 열전달촉진효과가 발생함과 동시에 압력강하 증가가 수반되는 것으로 알려져 있다.

한편 열전달전송 거칠기함수와 에틸렌글리콜 수용액의 물성치에 대한 관계를 파악하기 위해, 에틸렌글리콜 수용액의 프란틀수를 지수승하여 고려하였다. 열전달전송 거칠기함수와 유체의 프란틀수에 대한 상관관계는 Gee 와 Webb^[17], Nummer^[18], Han 등^[19]의 연구에서 보고된 바 있다. 따라서, 열전달전송 거칠기함수를 와이어코일의 각도, 프란틀수, 거칠기 레이놀즈수의 함수로 가정하고, h^* 와 $G(h^*, Pr)$ 의 상관관계를 구하였다. Ganeshan과 Raja Rao^[20]는 프란틀수의 영향을 파악하기 위해 5.2~32의 범위를 가지는 프란틀수에 대한 실험결과, 열전달전송 거칠기함수가 $Pr^{0.55}$ 에 비례한다고 보고한 바 있다. 또 Webb 등^[14]은 리브 거친관(rib-rough tube)을 이용한 실험결과 이 함수가 $Pr^{0.52}$ 에 비례한다고 보고한 바 있다. 이 연구에서는 프란틀수에 대한 열전달 영향을 Ganeshan과 Raja Rao^[20], Webb 등^[14]의 결과를 토대로 거친표면 해석을 수행한 결과, 열전달전송 거칠기함수로 열전달 상

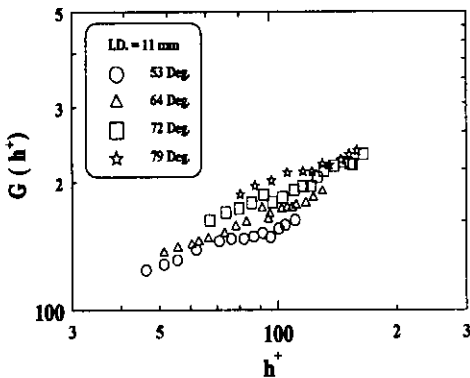


Fig. 8. Variation of $G(h^*)$ with h^* for the Various Wire-Coil-Inserted Tube. (11 mm)

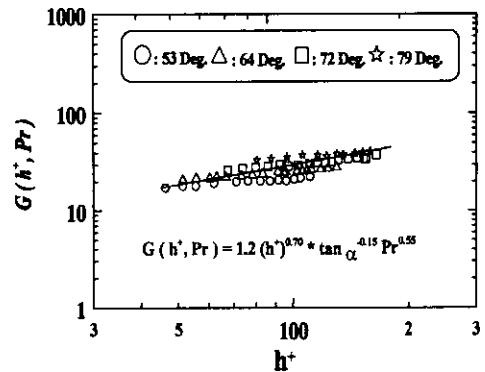


Fig. 10. Variation of $[G(h^*, Pr)]$ with h^* for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (11 mm)

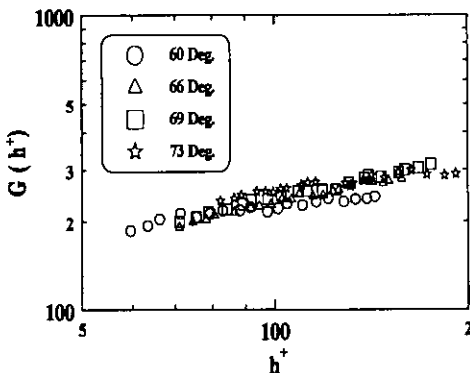


Fig. 9. Variation of $G(h^*)$ with h^* for the Various Wire-Coil-Inserted Tube. (13.88 mm)

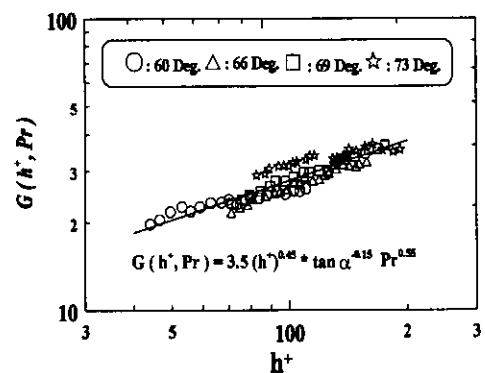


Fig. 11. Variation of $[G(h^*, Pr)]$ with h^* for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (13.88 mm)

관식을 거칠기 레이놀즈수, 코일각도 그리고 프란틀수를 포함하는 상관식을 식 (16), (17)과 같이 제안하였다. 한편, 본 연구에서 에틸렌글리콜 수용액의 프란틀수 범위는 30~42이다. 상관식들과 실험자료의 비교가 Figs. 10~11에 도시되어 있다. 그 실험결과, $G(h^+, Pr)$ 는 $Pr^{0.55}$ 에 비례하는 것으로 나타났으며, 코일의 각도에 따른 열전달 변화는 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

$$G(h^+, Pr) = 1.2(h^+)^{0.70} \tan\alpha^{-0.15} Pr^{0.55} \quad \text{for } (53^\circ \leq \alpha \leq 79^\circ, 11 \text{ mm}) \quad (16)$$

$$G(h^+, Pr) = 3.5(h^+)^{0.45} \tan\alpha^{-0.15} Pr^{0.55} \quad \text{for } (60^\circ \leq \alpha \leq 73^\circ, 13.88 \text{ mm}) \quad (17)$$

Fig. 12와 13은 운동량전송 거칠기합수에 대한 열전달전송 거칠기합수를 나타낸 그림이다. 본 실험에서 에틸렌글리콜 수용액의 질량유속범위는 400~1500 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)인데, 코일각도가 높을수록 질량유속에 대한 운동량전송 거칠기합수 범위가 좁아지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 유동조건 변화하더라도 압력강하는 크게 변하지 않

음을 알 수 있다. 또, 코일각도가 클수록 열전달전송 거칠기합수값의 기울기가 급하게 변함을 알 수 있다. 한편, 코일 각도가 53°와 60°는 다른 각도에 비해 운동량전송 거칠기합수 범위가 넓으며, 열전달전송 거칠기합수는 기울기가 완만하게 변함을 알 수 있다. 따라서 이를 종합해 보면, 코일각도가 높을수록 운동량전송 거칠기합수는 유동조건에 큰 영향을 받지 않았고, 열전달전송 거칠기합수는 코일각도가 감소할수록 변화기울기가 완만하였다. 이는 와이어코일의 각도가 낮을수록 넓은 유동범위에서 낮은 압력강하를 발생하였다. 또, 코일각도가 높을수록 유동범위와 무관하게 높은 압력강하를 발생시켰으며 높은 열전달효과를 발생하였다. 따라서, 와이어코일의 각도는 요구되는 열전달효과와 압력강하값에 알맞게 선정하여야 하며, 넓은 유동범위에서는 코일각도가 낮은 것일수록 유리한데, 본 연구에서 사용한 와이어코일 중에서 코일각도가 53°와 60°에서 열전달 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다.

Fig. 14와 15는 코일각도에 대한 열전달 효과와 압력강하 특성을 동시에 고려한 결과로, 거칠기 레이놀즈수에 대한 열전달전송 거칠기합수와 운동량전송 거칠기합

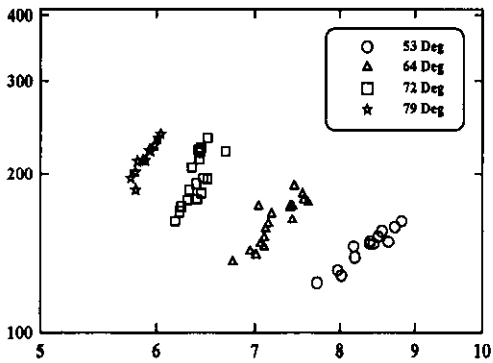


Fig. 12. Variation of $G(h^+)$ with $R(h^+)$ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (11 mm)

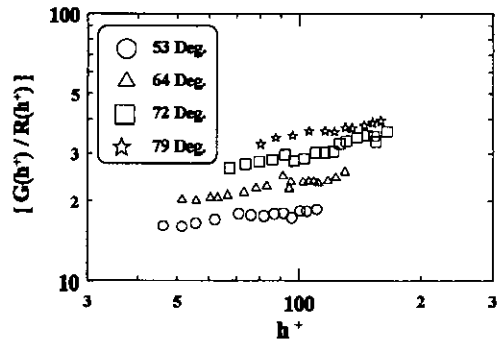


Fig. 14. Variation of $[G(h^+)/R(h^+)]$ versus h^+ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (11 mm)

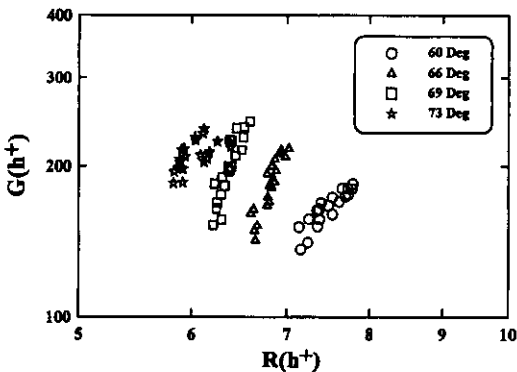


Fig. 13. Variation of $G(h^+)$ with $R(h^+)$ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (13.88 mm)

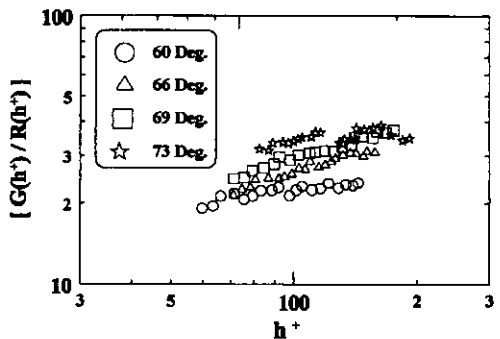


Fig. 15. Variation of $[G(h^+)/R(h^+)]$ versus h^+ for the Various Wire-Coil-Inserted Tubes. (13.88 mm)

수의 비를 나타낸 그림으로 $[G(h^+)/R(h^+)]$ 는 코일각도에 비례해서 나타났다. 여기서 운동량전송 거칠기함수는 관내 마찰계수와 반비례적 관계를 가지며, 코일각도가 낮을수록 높은 값을 가졌다. 특히, 코일각도가 53°와 60°인 경우에는 가장 높은 운동량전송 거칠기함수값을 가져, $[G(h^+)/R(h^+)]$ 가 가장 낮게 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 다양한 종류의 와이어코일에 대한 열전달 및 압력강하 특성실험을 수행하여, 그 실험결과를 기초로 거친표면해석을 수행하였다. 기존의 유동조건과 기하학적 조건 변화에 대한 상관식을 유동변수만의 함수로 표현하여 상관식의 적용이 국한된 반면, 거친표면해석은 유동조건과 기하학적 조건을 동시에 고려한 상관식을 제시함으로써 상관식의 적용과 범위를 용이하고 광범위하게 하였다. 거친표면해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 압력강하 특성을 나타내는 운동량전송 거칠기함수는 거칠기 레이놀즈수가 증가할수록 전반적으로 증가하였으며, 코일각도가 작을수록 낮게 나타났다. 운동량전송 거칠기함수는 마찰계수와 체적수력직경에 반비례 관계를 가지며, 코일높이에 비례하기 때문에 레이놀즈수가 증가하면 운동량전송 거칠기함수는 증가한다. 또, 코일각도가 증가하면 관내 마찰이 증가되어 높은 마찰계수를 발생된다. 따라서, 코일각도가 증가할수록 운동량전송 거칠기함수는 감소한다. 운동량전송 거칠기함수에 관한 상관식을 코일각도와 거칠기 레이놀즈수의 지수승 형태로 제시하였다.

둘째, 열전달 특성을 나타내는 열전달전송 거칠기함수는 거칠기 레이놀즈수와 코일각도의 증가에 따라 비례하는 것으로 나타났다. 거칠기 레이놀즈수가 증가할수록 레이놀즈수가 증가하여 열전달계수의 증가를 초래하고, 마찰계수는 감소하므로 결과적으로 열전달전송 거칠기함수는 증가한다. 또, 코일각도가 증가하면 레이놀즈수의 감소비율은 낮지만, 마찰계수가 증가하게 되고 열전달계수도 증가하게 되어 열전달전송 거칠기함수도 증가하게 된다. 열전달전송 거칠기함수 상관식을 거칠기 레이놀즈수, 코일각도, 프란틀수의 지수승 형태로 제안하였다.

본 연구에서 사용한 와이어코일 삼입관은 주로 낮은 유동범위에 낮은 압력강하와 비교적 높은 열전달촉진효과를 나타내는 것으로 알려져 있는데, 코일각도가 53°, 60°인 경우에 높은 운동량전송 거칠기함수와 비교적 넓은 범위의 열전달전송 거칠기함수 값을 나타내었다. 이 결과는 와이어코일을 사용하는 열교환기의 설계 시에 기초 자료로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 특히 와이어코일은 열교환기 내부에 탈착이 용이하여 슬

러지가 많이 발생하는 폐열회수용 열교환시스템에 적합하리라 판단한다.

후 기

이 연구는 1999년도 영남대학교 자유공모 과제사업 연구비로 지원되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

Nomenclature

A	: heat transfer area (m ²)
C _p	: specific heat (kJ/kg K)
D _i	: tube inside diameter (m)
D _{vd}	: volumetric hydraulic diameter (m)
e	: wire diameter (m)
f	: Darcy friction factor
G	: mass flowrate (kg/s)
G(h ⁺ , Pr)	: heat transfer roughness function
h	: heat transfer coefficient (W/m ² · K)
h ⁺	: roughness Reynolds number
h _R	: roughness height (m)
k _w	: thermal conductivity (W/m · K)
L	: length (m)
Nu	: Nusselt number
Pr	: Prandtl number
ΔP	: pressure drop (kPa)
Q	: heat transfer (W)
R(h ⁺)	: momentum transfer roughness function
Re	: Reynolds number (ρVD _{vd} /μ)
St	: Stanton number
u	: axial point velocity (m/s)
u*	: shear velocity (m/s)
V	: bulk average velocity (m/s)
y	: radial distance from the wall (m)
y*	: dimensionless radial distance from the wall

Greek Letters

α	: helix angle (deg)
ρ	: density (kg/m ³)
μ	: dynamic viscosity (m ² /s)
τ ₀	: shear stress (Pa)

Subscripts

f	: fluid
h	: hot side
i	: inner side

max : maximum value
 o : outer side
 w : wall

참고문헌

- Bergles, A.E., Nirmalan, V., Junkan, G.H. and Webb, R.L.: "Bibliography on Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer II", *Heat Transfer Laboratory Report HTL-31*, ISU-ERI-Ames-84221, Iowa State Univ., December (1983).
- Kummar, R. and Judd, R.L.: "Heat Transfer with Coiled Wire Turbulence Promoters", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 48, pp. 378-383 (1970).
- Sethumadhavan, R. and Rao, M.R.: "Turbulent Flow Heat Transfer and Fluid Friction in Helical-Wire-Coil-Inserted Tubes", *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 26 No. 12, pp. 1833-1845 (1983).
- Uttawar, S.B. and Raja Rao, M.: "Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 105, pp. 930-935 (1985).
- Nag, S. and Raja Rao, M.: "Forced Convection Heat transfer in Smooth Tubes Roughened by Helically Coiled Ribbons", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 7, pp. 1541-1544 (1987).
- Chiou, J.P.: "Experimental Investigation of the Augmentation of Forced Convection Heat Transfer in a Circular Tube using Spiral Spring Inserts", *Transactions of the ASME*, Vol. 300-307 (1987).
- Mehmet E. Arici, Habip Asan and Teoman Ayhan: "Enhancement of Turbulent Flow Heat Transfer in Tubes by means of Wire Coil Inserts", *ASME Engineering Systems Design and Analysis*, PD-Vol. 64-1, Vol. 1, pp. 113-116 (1994).
- Prasad, R.C. and Shen Jihua: "Performance Evaluation of Convective heat Transfer Enhancement Devices using Exergy Analysis", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 17, pp. 4193-4197 (1993).
- Nikuradse, J.: "Laws of Flow in Rough Pipes", *VDI Forschungsheft*, p. 361, English Translation, NACA TM-1292 (1965).
- Schlichting, H.: *Boundary-Layer Theory*, 7th Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 600-620 (1979).
- Dipprey, D.F. and Sabersky, R.H.: "Heat and Momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes at Various Prandtl Numbers", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 6, pp. 329-353 (1963).
- Hinze, J.O.: *Turbulence*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York (1975).
- Schlichting, H.: *Boundary-Layer Theory*, 7th Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 600-620 (1979).
- Webb, R.L., Eckert, E.R.G. and Goldstein, R.J.: "Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 601-617 (1971).
- ASHRAE: *ASHRAE Handbook of Fundamentals*, New York, pp. 20.5-20.7 (1994).
- Withers, J.G.: "Tube Side Heat Transfer and Pressure Drop for Tubes having Helical Internal Ridging with Turbulent/Transitional Flow of Single-Phase Fluid-Part I Single-Helix Ridging", *Heat Transfer Engng.* 2, pp. 48-58 (1980).
- Gee, D.L. and Webb, R.L.: "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 1127-1136 (1980).
- Nunner, W.: "Heat Transfer and Pressure Drop in Rough Pipes", *VDI Forschft* 22, pp. 4558 (1959).
- Han, J.C., Glicksman, L.R. and Rohsenow, L.M.: "An Investigation of heat Transfer and Friction of Rib Roughened Surfaces", *Int. J. Heat Mass Transfer* 21, pp. 1143-1156 (1978).
- Ganeshan, S. and Raja Rao, M: "Studies on Thermo-hydraulics of Single- and Multi-Start Spirally Corrugated Tubes for Water and Time Independent Power Law Fluids", *Int. Heat Mass Transfer* 25, pp. 1013-1022 (1982).