

와이어 코일이 삽입된 나선형 내면가공관의 열전달 및 압력강하 특성

Characteristics of Heat Transfer and Pressure Drop for Spirally Indented Tubes with Wire Coil Inserts

최인수*, 박병덕**, 남상철***

In-Su Choi, Byung-Duck Park, Sang-Chul Nam

<Abstract>

The characteristics of heat transfer and pressure drop through tubes has been investigated experimentally for a compound heat transfer enhancement. The test tubes were spirally indented tubes with wire coil inserts which had a various combinations of pitch and helix angles. Pure water was used as working fluids for the experiments. Heat transfer coefficients and friction factors of the test tubes were evaluated from the values of measured temperatures, flow rates and pressure drops. An performance evaluation was performed to find an optimal combination of spirally indented tubes with wire coil inserts. When the helix angle of wire coil insert are $71^\circ - 72^\circ$, the best heat transfer enhancement was shown. The friction factor was 9 - 13 times higher than those in smooth tubes, and the heat transfer was enhanced a maximum of 500%.

Key Words: *Compound Heat Transfer Enhancement, Spirally Indented Tube, Wire Coil Inserts, Volumetric Hydraulic Diameter*

* 정회원, 국립상주대학교 기계공학부 교수, 工博
호주 Univ. of New South Wales
742-711 경북 상주시 가장동 386번지

Professor School of Mechanical Engineering Sangju National
University 386, Sangju, Kyung Buk, 742-711, Korea
* 054-530-5402, ischoi@sangju.ac.kr

** 정회원, 국립상주대학교 기계공학부 교수, 工博
일본 Kyushu 대학 대학원

** 054-530-5335, bdpark@sangju.ac.kr

*** 정회원, 국립상주대학교 기계공학부 교수, 工博
영남대학교 대학원

*** 054-530-5408, scnam@sangju.ac.kr

기호설명

- C : 비열 [J/kg · K]
- D : 직경 [mm]
- E : 나선형 내면가공관의 종류
- L : 시험관의 길이 [m]
- h : 열전달 계수 [W/m² · K]
- k : 열전도 계수 [W/m · K]
- m : 작동유체의 질량유량 [kg/s]
- Nu : Nusselt 수
- p : 와이어 코일 또는 나선관의 피치 [mm]
- ΔP : 압력강하 [kPa]
- Q : 열전달률 [W]
- Re : 체적수력직경을 기준한 Reynolds 수
- T : 온도 [°C]
- t : 와이어 코일 두께 [mm]
- V : 유속 [m/s]
- W : 와이어 코일의 종류
- ρ : 작동유체의 밀도 [kg/m³]

하첨자

- cf : 냉수 또는 내부 유체
- dv : 체적수력직경
- hf : 온수 또는 외부 유체
- i : 입구 또는 내부
- o : 출구 또는 외부
- w : 벽면 또는 와이어 코일

1. 서론

열전달 촉진기술은 석유 자원의 고갈에 따른 에너지의 고효율화를 위해 과거 20여년간 많은 연구를 통한 발전을 이루어졌다.⁽¹⁾ 선진외국의 경우는 1930년대부터 본격적인 연구가 이루어졌고, 국내의 경우는 1980년대 후반부터 연구가 이루어졌다.

특히 Bergles et al.⁽²⁾은 열전달 촉진기술을 외부동력 사용의 유무에 따라 크게 무동력법과 유동력법으로 나누고, 다시 세부적 기술을 20여가지로 분류하였다. 무동력법은 외부동력 없이 열전달을 촉진시키는 방법으로 전열표면을 거칠게 함으로서 전열면적을 확대시킬 수 있고, 제작이 간편하고 마찰저항 증가가 다른 방법에 비해 낮아 각광받고 있다.⁽³⁾

Whither⁽⁴⁾, Li et. al.⁽⁵⁾, Ravigururajan and Bergles⁽⁶⁾과 같이 다수의 연구자들이 거친 표면관에 대해서 유동 특성실험을 수행하여 결과를 제시하였다. 특히, Lee et. al.⁽⁷⁾이 물과 에틸렌글리콜 수용액을 작동유체로 나선형 내면가공관에 대해 열전달 및 압력강하 실험을 수행하였고, 이 결과 Reynolds 수가 약 1,000부근에서 천이 된다고 보고하였다.

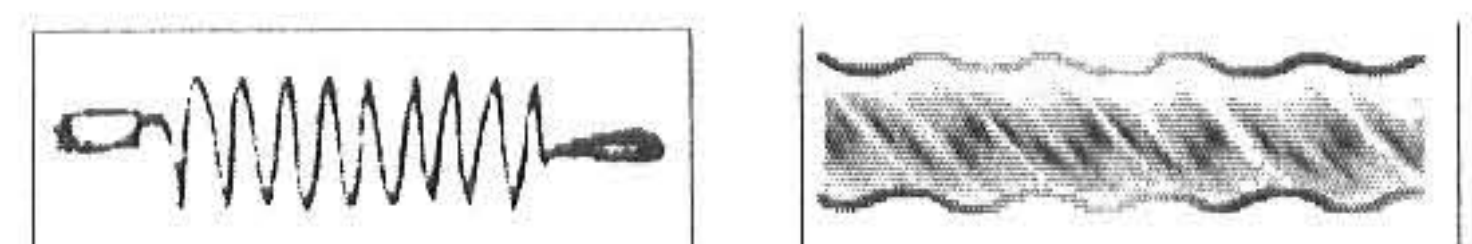
그리고 선회유동기구를 관내에 삽입하여 관로 유동시 2차 유동에 의한 와류를 발생시켜 유동내부에 에너지 혼합효과를 증대시키고 또한 관벽 부근에 형성되는 열경계층을 파괴시키는 한편, 열저항을 감소시키는 역할을 하여 열전달계수를 증가시키고 궁극적으로 열전달을 촉진시키는 방법들이 있다.⁽⁸⁾

복합 열전달 촉진기술은 앞에서 기술한 2가지 이상의 기술을 병합하여 열전달 촉진의 극대화를 위해 시도되었다. 그 원리는 거친 표면기법을 이용하여 점성저층을 파괴하고 작동유체의 열적 혼합효과를 증가시켜 열전달을 촉진시키는 것이다. 이러한 복합 열전달 촉진기술과 관련된 연구는 간헐적으로 발표되었는데, 대표적인 연구 사례로는 Bergles et. al.⁽⁹⁾이 미세하게 표면 처리된 거친표면관에 부차유동을 발생시키는 선회유동 유발체를 삽입하여 실험한 연구 결과가 있다. Table 1은 평활관에 다양한 형태의 삽입체 삽입한 경우와 내면을 가공한 나선관과 같은 열전달 촉진관에 대한 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구 수행조건들을 요약하였다. 이와 같이 많은 연구자들은 대부분 단일 열전달 촉진기술에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 나선형 내면가공관에 다양한 각도를 갖는 와이어코일을 삽입한 형태의 복합 열전달 촉진관을 제작한 복합 열전달 촉진기술을 개발하였고 이에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 고찰하였고 타 연구결과와 비교하였다.

2. 실험

2.1 실험장치



(a) Spirally indented tube

(b) Wire coil insert

Fig. 1 Heat transfer enhanced tube and insert.

Table 1 Techniques and experimental ranges for heat transfer enhancement

Authors	Medium	Reynolds No.	Tube type
Kidd, G. J. & JR. ⁽¹⁰⁾	Nitrogen	45,000 - 260,000	Spirally corrugated tubes
Sethumadhavan, R. & Rao, R. M. ⁽³⁾	Water & 50% Glycerol Sol.	3,000 - 70,000	Spirally corrugated tubes
Ravigururajan, T. S. & Bergles, A. E. ⁽⁶⁾	Water	2,500 - 35,000	Spirally indented tubes
Lee, S. C., Nam S. C., & Ban, T. G. ⁽¹⁷⁾	Water	4,000 - 25,000	Spirally indented tubes
	EG Sol.	500 - 5,000	
Kumar, R. & Judd, R. L. ⁽¹¹⁾	Water	6,000 - 100,000	Smooth tube + Wire coil inserts
Hong, S. W. & Bergles, A. E. ⁽¹²⁾	Ethylene glycol	13 - 390	Smooth tube + Twisted tape inserts
	Water	83 - 2,460	
Sethumadhavan, R. & Rao, R. M. ⁽¹³⁾	Water	8,000 - 80,000	Smooth tube + Wire coil inserts
	50% Glycerol	3,000 - 15,000	
Uttarwar, S. B. & Rao, R. M. ⁽¹⁴⁾	Servotherm oil	30 - 700	Smooth tube + Wire coil inserts
Nag, S. & Rao, R. M. ⁽¹⁵⁾	40% Glycerol	3,000 - 12,000	Smooth tube + Ribbon coil inserts
	Water	10,000 - 40,000	
Manglik, R. M. & Bergles, A. E. ⁽¹⁶⁾	Ethylene glycol	300 - 4000	Smooth tube + Twisted tape inserts
	Water	800 - 35,000	

Fig. 2는 복합 열전달 촉진관의 열전달 및 압력강하 특성을 규명하기 위한 실험장치를 나타낸 개략도이다. 실험장치는 나선형 내면가공관이 장착된 시험부, 유량측정부, 압력측정부, 온도측정부, 열교환기에 냉수 공급을 위한 냉각기와 온수공급을 위한 온수보일러, 각종 실험자료 획득을 위한 자료획득 장치로 구성하였다.

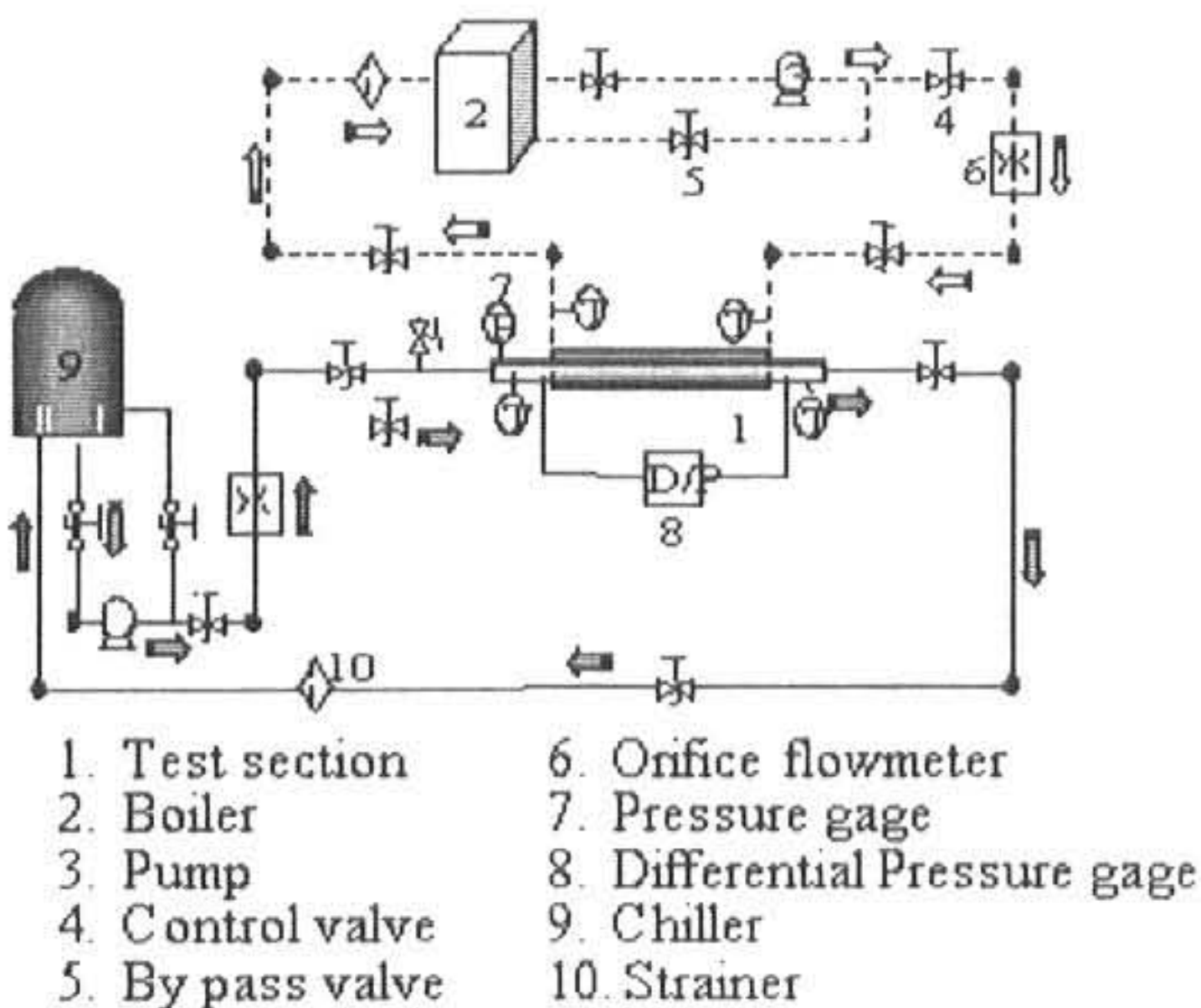
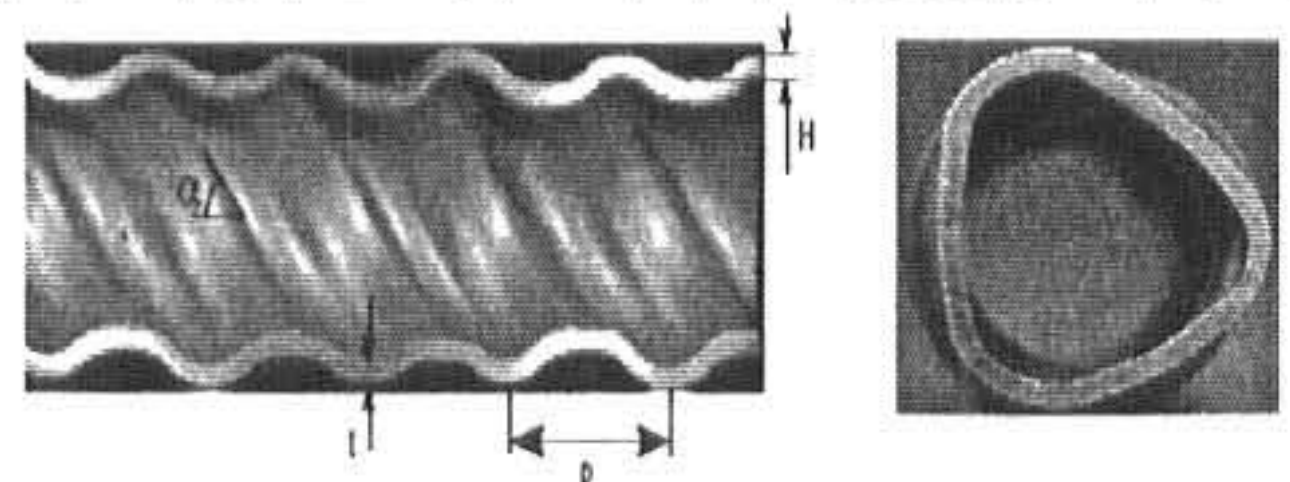


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

시험부는 제작 및 유지보수가 용이한 수평동심 2중관 형태의 열교환기를 사용하였으며, 냉수가 흐르는 내부관과 온수가 흐르는 외부관으로 나눌 수 있으며, 작동유체는 물을 사용하였다. 외부관은 외경 32mm의 평활관을 사용하였으며, 내부관은 외경이 15.88mm와 19.05mm의 나선형 내면가공관에 와이어 코일 삽입체를 삽입하여 사용하였으며, 시험부의 길이는 780mm이다.

주요측정인자는 벽면온도, 작동유체의 입·출구온도, 관내 압력 및 유량이며, 이들의 측정을 위해 열전대, 절대압력계, 차압계와 오리피스 유량계를 설치하였다. 시험부는 외부로부터의 열손실을 막기 위해

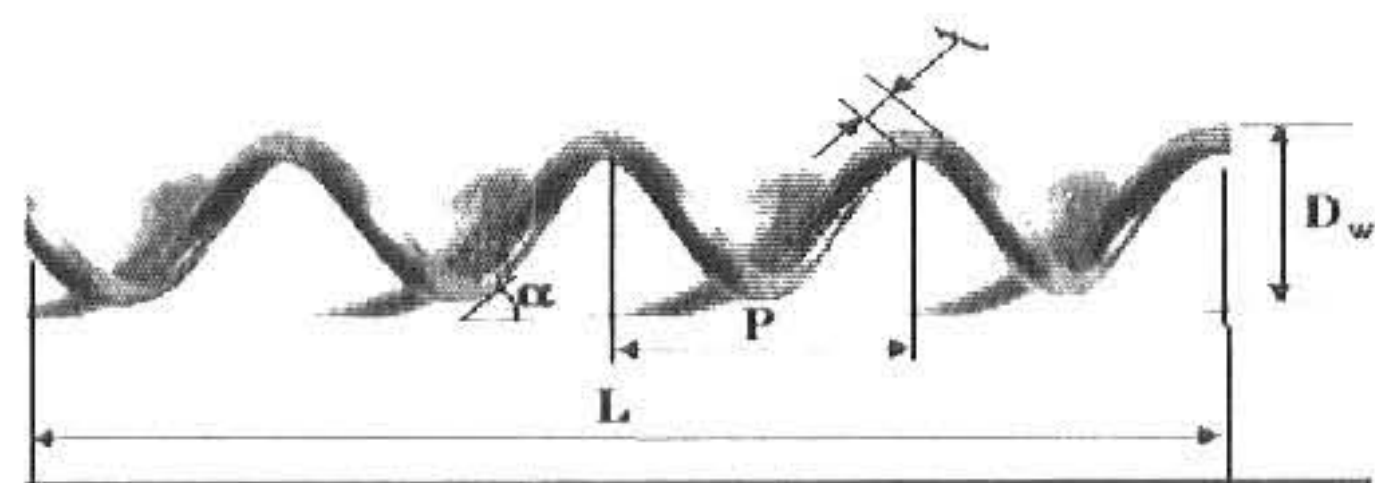


Material	O. D. (mm)	t (mm)	α	p (mm)
E1 Cu	15.88	1.02	50°	13
E2 Cu	19.05	1.02	50°	13

Fig. 3 Geometries of spirally indented tubes.

폴리우레탄 단열재로 단열시켰다.

Fig. 3은 실험에 사용된 두 종류의 나선형 내면가공관의 기하학적 형상과 치수를 나타냈고, Fig. 4는 시험관에 삽입된 와이어코일 삽입체의 기하학적 형상과 치수를 나타냈다.



Type	D _w (mm)	t (mm)	p (mm)	α (deg)
W1	11.00	2	20	53
W2	11.00	2	15	64
W3	11.00	2	10	72
W4	11.00	2	6	79
W5	13.88	3	23	60
W6	13.88	3	18	64
W7	13.88	3	15	66
W8	13.88	3	12	71

Fig. 4 Geometries of wire coil inserts.

시험관부 내·외부관으로 순환하는 유체의 유량을 조절하기 위하여 유량조절밸브와 바이패스 밸브를 설치하였다. 그리고 시험부 내·외부관의 입구에 각각 목 직경비가 0.5와 0.6의 칼날형 오리피스와 차압계를 사용하여 유체의 유량을 측정하였다. 또한 순환하는 유체의 온도를 측정하기 위해 시험부 내·외부관의 입·출구에 열전대를 설치하였다. 대류 열전달계수를 구하기 위하여 관표면의 온도를 측정하였는데 정확성을 기하기 위해 시험부 내부관 외벽에 동일한 원주방향으로 세 지점에 열전대를 설치하였다. 각 지점에서의 온도측정은 T형(φ0.3) 열전대를 사용하였고, 시험부 입·출구 압력 및 압력강하는 절대압력계와 차압계를 동시에 사용하여 측정하였다.

2.2 실험 방법 및 실험자료 해석

시험부 내부관에는 냉각기에 의해 냉각된 5 ~ 10℃ 의 냉수를, 외부관에는 보일러에 의해 40℃로 가열된 온수를 대향류로 순환시켜 실험을 수행하였다. 정확한 실험결과를 얻기 위해 열수력학적으로 정상상태에 도달하였을 때 실험자료를 획득하였는데, 복합 열전달촉진관의 내·외부관에 흐르는 온수와 냉수의 에너지 평형을 이루는 시기에 실험을 시

Table 2 Configuration of test tubes and their volumetric hydraulic diameter

Tube types	Volumetric hydraulic diameter (D _{dv})
E1	12.57mm
E2	15.55mm
E1 + W1	12.40mm
E1 + W2	12.15mm
E1 + W3	11.97mm
E1 + W4	11.62mm
E2 + W5	14.78mm
E2 + W6	14.64mm
E2 + W7	14.49mm
E2 + W8	14.35mm

작하였다.

본 연구에 사용된 작동유체의 물성치는 ASHRAE Handbook⁽¹⁷⁾의 자료를 사용하였고, 실험한 2중관 열교환기 내부 열전달계수는 식(1)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$h = \left[\frac{\pi D_{dv} L (T_w - T_{cf})}{Q} - \frac{D_{dv}}{2k_w} \ln \left(\frac{D_o}{D_{dv}} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서 T_w는 평균벽면온도이고, T_{cf}는 내부 작동유체의 평균온도이다. 식(1)에서 열전달율 Q는 에너지 평형식, 식(2)와 외부관 작동유체의 평균온도와 질량유량으로 계산할 수 있다.

$$Q = m_{hf} C_{hf} (T_{hf,i} - T_{hf,o}) \quad (2)$$

그리고 마찰계수는 Darcy 마찰계수를 사용하였는데, 식(3)과 같다.

$$f = \frac{\Delta P}{(L/D) (\rho V^2/2)} \quad (3)$$

본 연구에서 사용한 Nusselt 수, 마찰계수, Reynolds 수 등은 체적 수력직경⁽¹⁸⁾을 기준으로 한 것이다. 그리고 실험을 수행한 관과 삽입체의 조합 및 그들의 체적 수력직경은 Table 2에 제시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

나선형 내면가공관에 와이어코일 삽입체를 삽입한 복합 열전달 촉진관에 대하여 Table 2에 나타낸 조

합으로 실험하였고, 복합 열전달 및 압력강하 특성 등을 타 연구결과와의 비교 및 고찰을 위해 무차원 수를 사용하여 마찰계수와 Nusselt 수로 나타냈었다. 이 때 Reynolds 수의 범위는 4,000~18,000이다.

3.1 마찰계수

Fig. 5는 나선형 내면가공관의 외경이 15.88mm 인 복합 열전달 촉진관에 대한 마찰계수를 각각 Reynolds 수의 함수로 도시한 결과이다. 여기에서 기호로 나타난 형식은 Fig. 4에 표기된 시험관을 의미한다. 열전달 촉진법을 사용할 때 마찰계수의 증가는 열전달 촉진을 야기하는데 소요되는 동력을 의미하므로 매우 중요한 인자이다. 나선형 내면가공관의 경우, 마찰계수의 증가에 비해 열전달 계수의 증가가 더 현저하다고 발표된 바 있으며⁽³⁾, 와이어코일 삽입체의 경우 그 증가율은 선회유동 기구들 가운데 비교적 낮은 것으로 알려져 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 와이어코일 삽입체를 삽입하지 않은 나선형 내면가공관의 마찰계수는 평활관보다 약 200%정도 증가하는 경향을 보였다. 이것을 Sethumadhavan et. al.⁽³⁾의 결과와 비교하였는데 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 나선형 내면가공관에 와이어코일 삽입체를 삽입한 복합 열전달 촉진관은 와이어코일의 피치가 가장 큰 경우, 즉, 경사각이 53° 인 경우에 Reynolds 수가 증대됨에 따라 마찰계수가 평활관보다 900% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과를 와이어코일의 피치가 가장 작은 경우에 대해서, 평활관에 와이어코일 삽입체를 삽입한 Hideo et.

al.⁽¹⁹⁾의 결과와 비교하였는데 약 200% 정도 높게 나타났다.

Fig. 6은 나선형 내면가공관의 외경이 19.05mm인 복합 열전달 촉진관에 대한 마찰계수를 Reynolds 수의 함수로 도시한 결과이다. 와이어코일 삽입체를 삽입하지 않은 열전달 촉진관의 마찰계수는 평활관보다 200%정도의 증가가 발생했으며, 피치가 가장 큰, 즉, 경사각이 60° 인 와이어코일 삽입체를 삽입한 복합 열전달 촉진관의 마찰계수는 평활관보다 약 1,300%정도의 마찰계수 증가를 나타내었다.

이상의 결과에서 와이어코일 삽입체의 경사각이 높아질수록 마찰계수가 점차적으로 증가함을 알 수 있는데, 이는 복합 열전달 촉진관 내부의 단위 길이 당 와이어코일 삽입체가 차지하는 면적이 증가하고, 와이어코일 삽입체의 삽입으로 수력직경비가 나선형 내면가공관 단독의 경우에 비해 감소하였기 때문이다. 또, 와이어코일 삽입체는 나선형 내면가공관의 홈에 잘 일치되도록 제작되었으므로 벽면에 잘 밀착되어 표면거칠기를 증가시켰기 때문이다.

3.2 열전달 특성

Fig. 7은 나선형 내면가공관의 외경이 15.88mm 인 복합 열전달 촉진관에 대한 열전달 특성을 Reynolds 수의 함수로 도시한 그림이다. Fig. 6의 경우(관의 외경이 19.05mm)와 같이 와이어코일 삽입체를 삽입한 복합 열전달 촉진관에 비해 열전달 성능은 저하되었으나, 삽입한 와이어코일 삽입체의 각도에 따른 열전달 성능이 두드러지게 다르게 나타

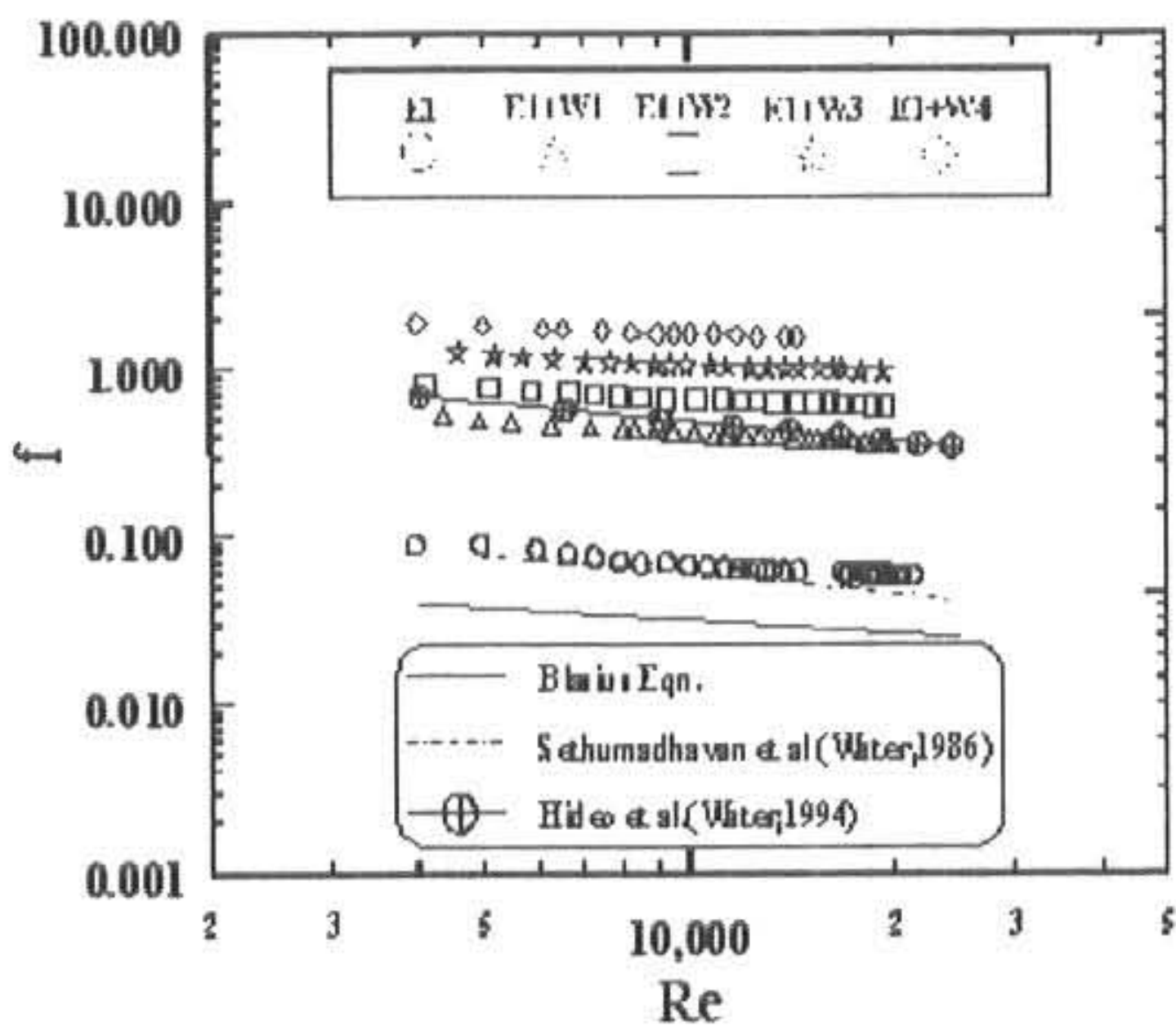


Fig. 5 Friction factors obtained in the E1 tube types using pure water.^(3, 19)

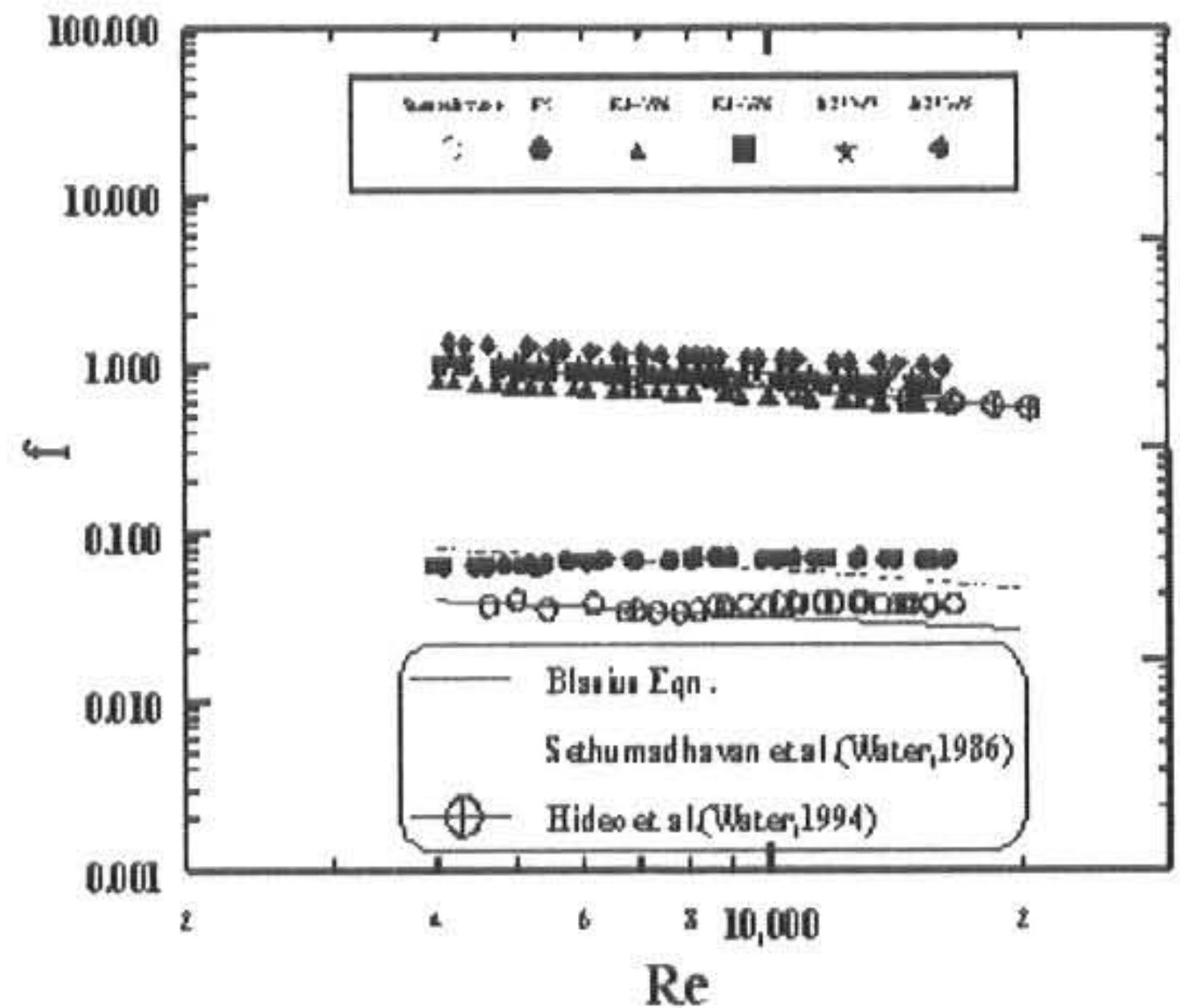


Fig. 6 Friction factors obtained in the E2 tube types using pure water.^(3, 19)

나지 않았다.

한편, Nag and Rao⁽¹⁵⁾는 40% 글리세릴을 사용하였고, 평활관에 리본코일을 삽입하여 열전달 특성에 관한 연구를 수행하였는데, 본 실험결과가 약 150~400%의 열전달이 더 증가되었다. Kummar and Judd⁽¹¹⁾는 평활관에 와이어코일을 삽입한 경우로 본 실험결과보다 낮게 나타났다. 이들의 연구는

모두 단일 열전달 촉진기술을 사용한 경우인데 비해, 본 연구는 단일 열전달 촉진기술을 2가지 병합한 복합 열전달 촉진기술을 사용한 경우이므로 열전달 성능이 우수하게 나타났다.

Fig. 8은 나선형 내면가공관의 외경이 19.05mm인 복합 열전달 촉진관에 대한 열전달 특성을 Reynolds 수의 함수로 각각 도시한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 평활관보다 최대 400%의 열전달 성능향상을 나타내었고, 단일 열전달 촉진 결과인 Nag and Rao⁽¹⁵⁾와 Kummar and Judd⁽¹¹⁾의 결과보다 최대 200%의 열전달 성능향상을 나타내었다.

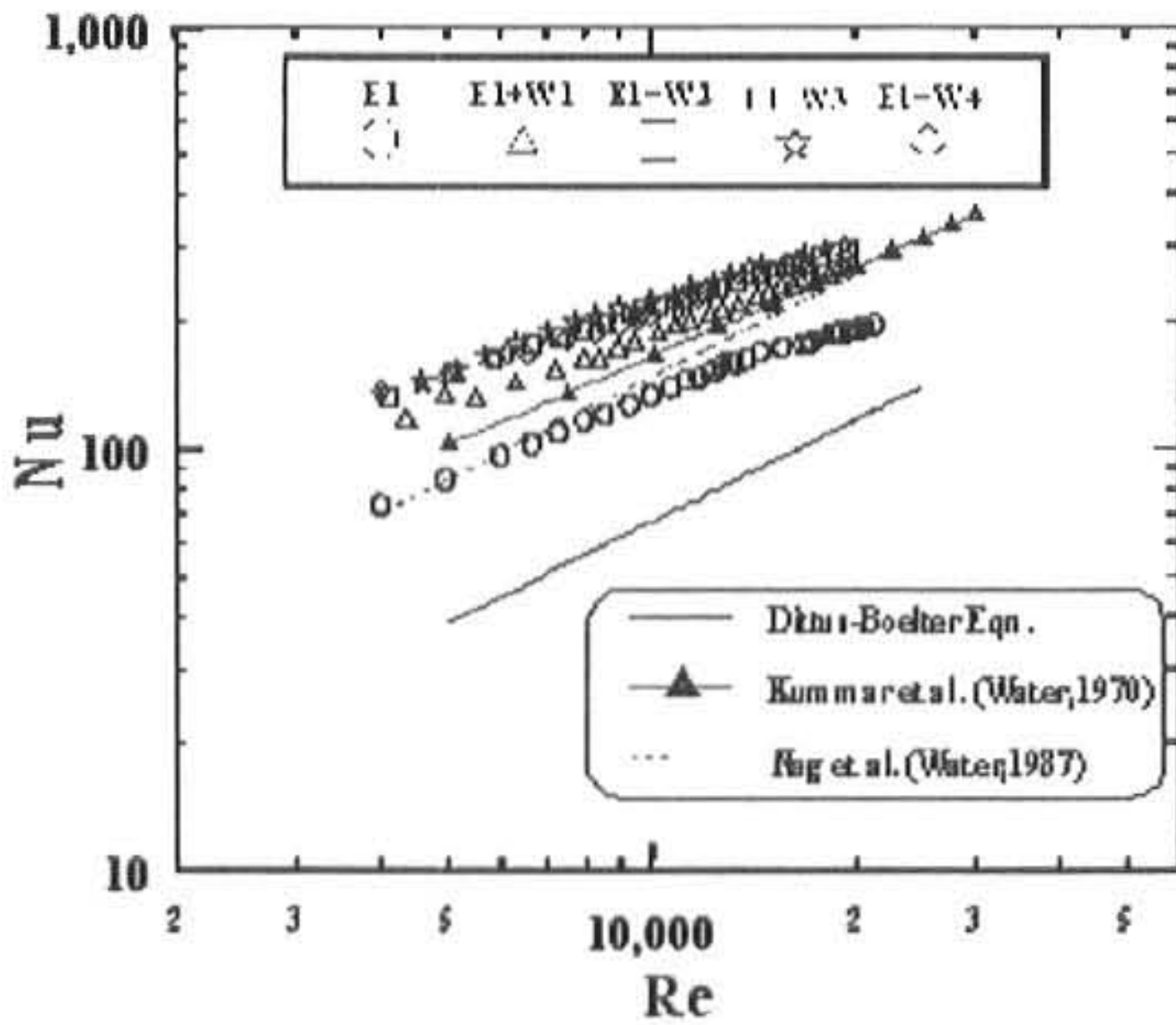


Fig. 7 Nusselt numbers obtained in the E1 tube types using pure water.^(11, 15, 20)

이상에서와 같이 나선형 내면가공관에 와이어코일을 삽입한 복합 열전달 촉진관은 관 내부의 열전달 면적 증가, 벽면의 거칠기 증가, 벽면 근처에 형성되어 있는 열경계층 파괴로 인한 열저항 감소와 부가적으로 와이어 코일 삽입체가 관 내부에서 선회유동을 유발시켜 유체의 혼합을 극대화시켜 열전달 성능을 향상시켰다.

한편, 와이어 코일 삽입체는 각도가 증가할 수록 열전달 성능은 비례하여 향상되었으나, 나선관의 외

경이 15.88mm일 때 사용한 코일각도가 79° 일 경우는 72° 에 비해 열전달 성능이 오히려 낮게 나타났다. 이는 본 연구에 사용된 와이어 코일 삽입체의 임계각도가 존재함을 할 수 있었으며, 코일각도가 72° 임을 추정할 수 있다.

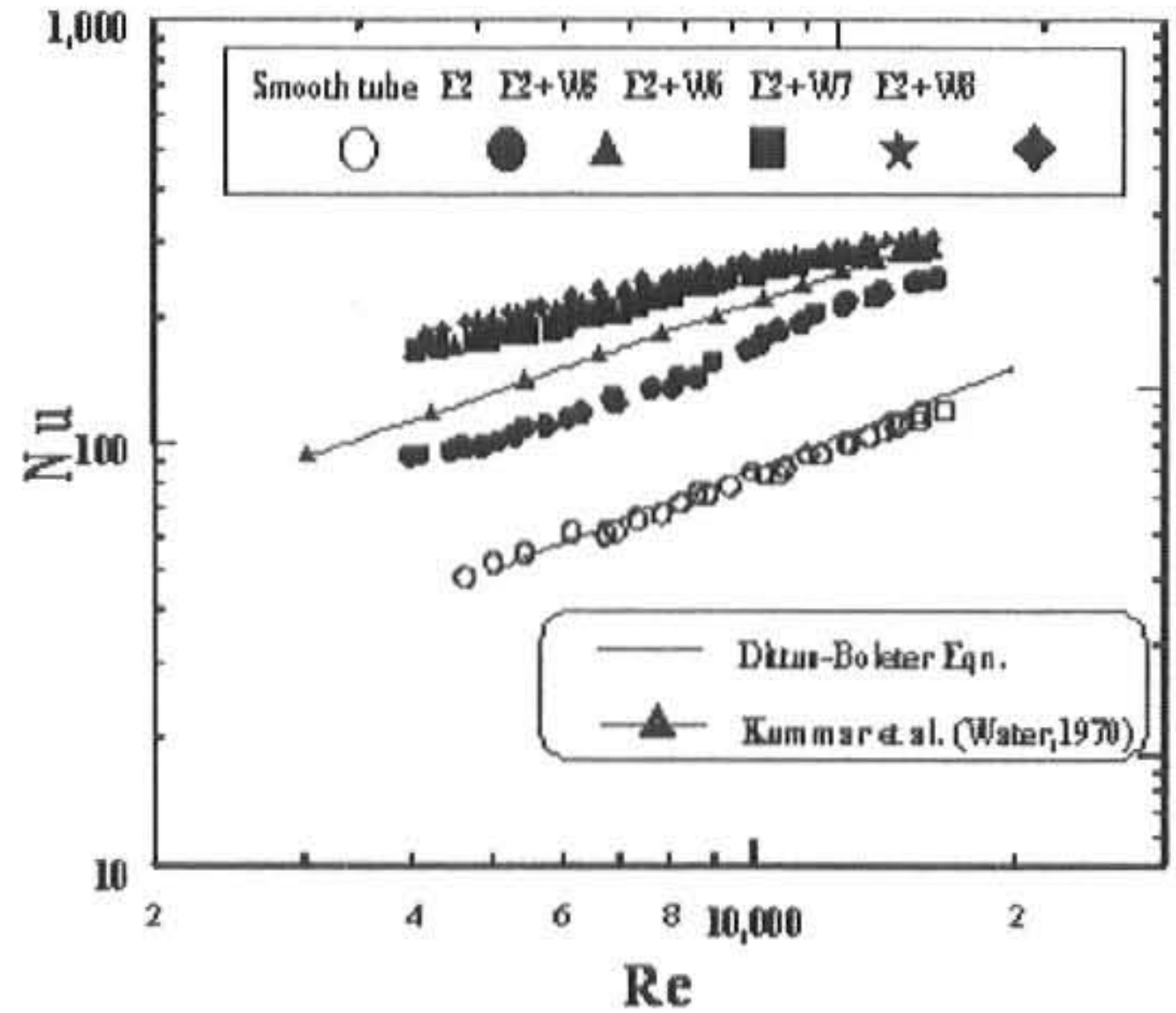


Fig. 8 Nusselt numbers obtained in the E2 tube types using pure water.^(11, 20)

4. 결론

나선형 내면가공관에 와이어 코일을 삽입한 복합 열전달 촉진관에 대해 열전달 및 압력강하 특성을 규명하기 위해 순수 물을 작동유체로 사용하여 실험 고찰하였다. 실험조건에 대한 성능실험 수행 결과, 평활관보다 와이어코일의 삽입체의 피치가 가장 큰 경우(E2+W5)에 대해서 마찰계수가 약 9~13배 정도 높게 나타났다. 또한, 열전달 성능향상은 최대 500% 높게 발생하였다. 한편, 복합 열전달 촉진관에 삽입된 와이어 코일의 최적 결합조건은 내면을 가공한 나선관의 외경이 15.88mm와 19.05mm일 때 와이어코일의 경사각이 각각 72°, 71° 가 될 때 최대의 열전달 성능향상을 나타내었다.

참고문헌

- 1) Reay, D.A., Heat transfer enhancement - a review of techniques and their possible impact on energy efficiency in the U. K., Heat Recovery Systems & CHP, Vol.11, No.1, pp.1-40 (1991)

- 2) 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)
- 3) Sethumadhavan, R. and Rao, R.M.: Turbulent flow friction and heat transfer characteristics of single and multi start spirally enhanced tubes, J. Heat Transfer, Vol.108, pp.55-6 (1986)
- 4) Withers, J.G.: Tube-Side heat transfer and pressure drop for tubes having helical internal ridging with turbulent/transition flow of single-phase fluid. part1. single-helix ridging, Heat Transfer Engineering, Vol.2, No.1, pp.48-58 (1980)
- 5) Li, H.M., Ye, K.S., Tan, Y.K. and Deng, S.J.: Investigation on the tube side flow visualization, friction factors and heat transfer characteristics of helical ridging tubes, Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Vol.3, pp.75-80, (1982)
- 6) Ravigururajan, T.S. and Bergles, A.E.: An experimental verification of general correlations for single phase turbulent flow in ribbed tubes, Advances in Heat Exchanger Design, HTD-Vol.66, pp.1-11 (1986)
- 7) Lee, S.C., Nam, S.C. and Ban, T.G.: Performance of heat transfer and pressure drop in a spirally indented tube, KSME International Journal, Vol.12, No.5, pp.917-925, (1998)
- 8) Nam, S.C., Lee, J.D. and Lee, S.C.: Evaluation of heat transfer performance of wire-coil inserted tube, SAREK Journal, Vol.12, No.5, pp.457-465 (2000)
- 9) Bergles, A.E., Lee, R.A., and Mikic, B.B.: Heat transfer in rough tubes with tape-generated swirl flow, J. Heat Transfer, pp. 443-445 (1969)
- 10) Kidd, G.J., JR.: The heat transfer and pressure drop characteristics of gas flow inside spirally corrugated tubes, J. Heat Transfer, pp.513-519 (1970)
- 11) Kummar, R. and Judd, R.L.: Heat transfer with coiled wire turbulence promoters, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.48, pp.378-383 (1970)
- 12) Hong, S.W. and Bergles, A.E.: Augmentation of laminar flow heat transfer in tubes by means of twisted-tape inserts, Journal of Heat Transfer, Vol.98, pp.251-256, (1976)
- 13) Sethumadhavan, R. and Rao, R.M.: Turbulent flow heat transfer and fluid friction in helical wire coil inserted tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.26, No.12, pp.1833-1845 (1983)
- 14) Uttarwar, S.B. and Rao, R.M.: Augmentation of laminar flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts, J. Heat Transfer, Vol.107, pp.930-935 (1985)
- 15) Nag, S. and Rao, R.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)
- 16) Manglik, R.M. and Bergles, A.E.: Heat transfer enhancement and pressure drop in viscous liquid flows in isothermal tubes with twisted-tape inserts, Wärme und Stoffübertragung, Vol.27, pp.249-257 (1992)
- 17) ASHRAE: ASHRAE handbook fundamentals, Chap. 20, pp.20.1-20.10 (1997)
- 18) Webb, R.L.: Principles of enhanced heat transfer, John Wiley & Sons, New York, pp.1-32 (1994)
- 19) Hideo, I., Koichi, O. and Shinichi K.: A Fundamental study of heat transfer enhancement and flow drag reduction in tubes by mean wire coil insert, Trans. of JSME, Vol.80, No.569, pp.240-247 (1994)
- 20) Mills, A.F.: Heat transfer, Richard D. Irwin, INC., p.256 (1992)

(2001년 9월 15일 접수, 2001년 11월 26일 채택)