

## 와이어코일 삽입법을 이용한 열전달 촉진기술 성능평가

이 주 동, 박 종 호, 이 상 천<sup>†</sup>

영남대학교 기계공학과 대학원\*, 영남대학교 기계공학부

### Evaluation of Heat Transfer Performance of Wire-coil Inserted Tube

Joo-Dong Lee, Jong-Ho Park, Sang-Chun Lee<sup>†</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyung-San 214-1, Korea

<sup>†</sup> Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyung-San 214-1, Korea

(Received June 6, 1999; revision received February 11, 2000)

**ABSTRACT:** An experiment was carried out to evaluate the thermal performance of the wire-coil inserts method. Tested were the smooth tubes with the wire-coil inserts of various pitch and helix angle combinations. Test fluids were the 50%-solution of the ethylene glycol and the pure water. Heat transfer coefficients and friction factors were deduced from the measured values of temperatures, flowrates and pressure drops. A unified dimensionless correlation for the heat transfer coefficients was developed as a function of the pitch to diameter ratio, the Reynolds number and the Prandtl number. An exergy analysis was performed to evaluate an optimal operating condition with the wire-coil inserts.

**Key words:** Wire-coil inserts(와이어코일 삽입), Exergy analysis(엑서지 해석), Heat transfer enhancement(열전달 촉진), Friction factor(마찰계수)

#### 기 호 설 명

$C_p$  : 비열[kJ/kg · K]

$D$  : 관 직경[m]

$D_w$  : Wire coil inserts의 외경[m]

$f$  : 관 마찰계수

$G$  : 질량유량[kg/s]

$h$  : 열전달 계수[W/m<sup>2</sup> · K]

$i$  : 엔탈피[kJ/kg]

$k$  : 열전도 계수[W/m · K]

$L$  : 시험부 전구간 길이[m]

$Nu$  : 누셀트수,  $hD/k$

$P$  : 압력[N/m<sup>2</sup>]

$p$  : 와이어코일의 피치[mm]

$Pr$  : 프란틀 수,  $\nu/\alpha$

$\Delta P$  : 압력강하[kPa]

$Q$  : 열전달률[W]

$\rho$  : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

$Re_{Dv}$  : 등가 레이놀즈수,  $\rho VD_{Dv}/\mu$

$s$  : 엔트로피[J/kg · K]

$T$  : 온도[K]

$V$  : 속도[m/s]

$\nu$  : 비체적[m<sup>3</sup>/kg]

$\phi$  : Specific flow-exergy [Jkg<sup>-1</sup>]

$\Psi$  : Flow-exergy [J]

$\Delta \Psi$  : Flow-exergy destruction [J]

$\Delta \Psi^*$  : Dimensionless flow-exergy destruction

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-53-810-2453; fax: +82-53-813-3703

E-mail address: scllee@yu.ac.kr

### 하첨자

cf	: 내부관 작동유체
DV	: 체적수력직경
hf	: 외부관 작동유체
i	: 입구
inner	: 관내부
o	: 출구
outer	: 관외부
w	: 벽면
0	: Reference state

## 1. 서 론

열전달 촉진기술은 에너지의 발생, 전달, 교환 등의 장치에서 고온유체와 저온유체 사이의 열교환량을 증대하기 위한 기술로 최근 20년 동안 비약적으로 발전해 왔다.<sup>(1)</sup> 열전달 촉진기술을 사용할 경우, 장치내 높은 마찰계수로 인하여 압력강하가 증가하며 결과적으로 소요동력의 증가를 수반하는 문제점을 가지고 있음에도 불구하고 기기의 고성능화 및 고효율화, 장치제작비 및 운전비용, 유지보수비용의 절감 그리고 장치의 소형화를 이룰수 있는 이점이 있다. 이 기술은 공조냉동시스템의 응축기 및 증발기, 발전설비용 열교환기, 전자기기의 냉각, 폐열회수용 열교환기 등 광범위한 분야에서 응용되고 있다.

열전달 촉진에 대한 연구는 선진외국의 경우 1930년대부터 본격적으로 이루어졌으며, 국내의 경우 1980년대 후반부터 이 분야에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.<sup>(2)-(3)</sup> Bergles (1983)<sup>(4)</sup>는 열전달 촉진법을 세부적으로 20여가지로 분류하였는데, 크게 나누면 무동력법(passive technique)과 유동력법(active technique)으로 구분된다. 무동력법은 외부동력의 사용없이 단순히 전열면을 거칠게 하거나 열전달 촉진기구를 사용하는 기술로, 표면처리(treated surface), 거친표면(rough surface), 확장표면(extended surface), 선회유동기구(swirl flow device) 등이 포함된다. 이 가운데 선회유동기구(swirl flow device)는 인위적으로 관내부 유동을 선회시키는 기구로 와이어코일 삽입(wire-coil inserts), 비틀림테이프 삽입(twisted-

tape inserts), 헬리컬깃 삽입(helical-vane inserts) 등이 있다. 이 들의 삽입으로 부차유동에 의한 와류(vortex)가 발생하여 유동내 에너지 혼합효과가 증대되며 또한 관벽부근에 형성되는 열경계층(thermal boundary layer)을 파괴하여 열저항을 감소시켜 열전달을 촉진시키는 역할을 한다.

선회유동기구법중 와이어코일 삽입법은 제작의 용이성, 저렴한 가격 그리고 비교적 낮은 압력강하치 때문에 널리 이용되고 있다. 이 방법에서의 주요인자는 와이어코일의 굵기, 관직경과의 비율, 나선각(helix angle), 그리고 피치(pitch)인데, 광범위한 범위의 이들 인자치에 대한 열전달 및 압력강하 특성치의 상관식이 제공되는 것이 이 기술의 다양한 활용을 위하여 중요하다.

Uttarwar과 Raja Rao (1985)<sup>(5)</sup>는 관내에 와이어코일을 삽입하고 층류유동범위의 servotherm oil에 대하여 열전달 특성실험을 수행하였다. 그 결과, 와이어코일을 삽입하지 않은 경우보다 최고 400%까지 열전달 촉진이 이루어지며, 또한 나선각이 클수록 열전달 효과가 크다고 보고하였다. Sethuamdhavan과 Raja Rao (1983)<sup>(6)</sup>는 관내에 헬리컬 와이어코일을 삽입하여 순수한 물과 에틸렌글리콜 수용액(50%)에 대하여 열전달 특성실험을 수행한 결과 스탠튼 수(Stanton number)가 최고 150%까지 증가하였고, 높은 프란틀수를 가진 작동유체일수록 나선각이 클수록 열전달이 향상된다는 사실을 제시하였으며, 실험한 레이놀즈수의 범위는 4,000~100,000이다. 또, Nag와 Raja Rao (1987)<sup>(8)</sup>는 피치가 다른 세 개의 리본코일(ribbon coil)을 삽입하여 순수한 물과 40% 글리세롤에 대하여 열전달 및 압력강하 특성실험을 수행하여 평활관에 비해 최고 200% 이상 열전달이 향상되었다고 발표하였다.

Prasad와 Shen(1993)<sup>(10)-(11)</sup>은 와이어코일 인서트를 이용한 열전달 촉진관에 대해 열역학 제 1, 2법칙을 이용하여 엑서지(exergy)의 변화를 규명하였고, 최적 운전조건은 레이놀즈수가 60,000 부근에서 발생함을 보고한 바 있다. 그러나, 지금까지 수행된 열전달 촉진의 연구 결과는 열전달 촉진과 압력강하의 현상 규명에만 치중하였다. 본 연구에서는 열전달 촉진의 경제성 평가의 지침이 될 수 있는 엑서지 해석을 통하여 본 실험에서 사용한 와이어코일의 경우에 대한 최적운전조건을 제시해 보았다. 이 연구에서는 순수한 물과

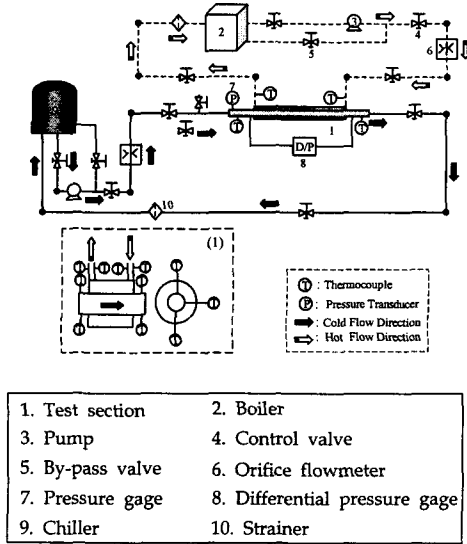


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

에틸렌글리콜 수용액을 작동유체로 하여 평활관과 와이어코일 인서트를 사용한 열전달 촉진관에 대한 열전달과 압력강하 특성을 파악하였다. 실험을 통해 얻어진 자료들을 토대로 열전달계수와 마찰계수를 계산하였고, 체적수력직경(volumetric hydraulic diameter)<sup>(14)</sup>을 사용하여 순수한 물과 에틸렌글리콜 수용액(50%)에 동시에 적용시킬 수 있는 상관식을 제시하였다. 또한, 본 실험결과와 타 연구결과의 비교검토를 통해 실험자료의 신뢰성을 보여주었다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 와이어코일 인서트를 삽입한 열전달 촉진관에서의 열전달 및 압력강하 특성을 규명하기 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다.

시험부의 열교환기 형태는 구조가 간단하고 작동온도와 압력범위가 광범위하며, 제작 및 유지보수가 용이한 수평동심 2중관 열교환기를 채택하였으며, 순수한 물과 에틸렌글리콜 수용액(50%)에 대하여 각각 단상 열전달 실험을 수행

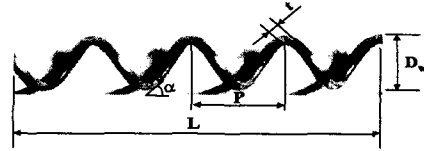


Fig. 2. Wire-coil inserts : sectional view.

하였다. 시험부는 외부관과 내부관으로 구분되고, 외경 32mm의 평활관을 외부관으로 사용하였으며 외경이 12.70mm와 15.88mm의 평활관에 와이어코일 인서트를 삽입한 열전달 촉진관을 각각 내부관으로 사용하였고, 시험부의 길이는 0.78m이다. 실험장치는 시험부, 유량측정부, 압력측정부, 온도측정부, 칠러(chiller), 온수보일러(boiler) 그리고 자료획득장치로 구성되어 있다. 주요측정인자는 벽면온도, 작동유체의 입·출구온도, 압력 및 유량이며 이들 인자의 측정을 위해 열전대, 절대압력계, 차압계와 오리피스 유량계를 설치하였다. 시험부는 외부로의 열손실을 막기 위해 폴리우레탄 단열재로 단열처리 하였다. Fig. 2는 열전달 촉진관에 삽입된 와이어코일 인서트의 기하학적 형상을 나타내었고, Table 1에는 본 실험에 사용된 열전달 촉진관에 대한 제원을 자세히 나타내었다.

시험부 내·외부관을 순환하는 유체의 유량을 조절하기 위하여 유량조절밸브(control valve)와 바이패스 밸브(by-pass valve)를 설치하였으며, 순환유량의 측정은 시험부 내·외부관의 입구부분에 각각 목직경비 0.5와 0.6의 칼날형 오리피스(sharp-edged orifice)를 설치하고 이것을 차압계(differential pressure transducer)에 연결하여 작동유체의 유량을 측정하였다. 또한, 시험부 내·외부관을 순환하는 유체의 온도변화를 측정하기 위해 시험부 내·외부관의 입·출구에 열전대를 설치하였다. 대류 열전달계수를 구하기 위하여 관표면의 온도를 측정하였는데 정확성을 기하기 위해 시험부 내부관 외벽에 동일한 원주방향으로 3 지점에 열전대를 설치하였다. 각 지점에서의 온도측정은 T형(copper-constantan,  $\phi$  0.3mm)열전대를 사용하였고, 온도측정의 불확실성(uncertainty)은  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이다. 시험부 입·출구 압력 및 압력강하는 절대압력계와 차압계(differential pressure transducer)를 동시에 사용하여 측정하였다. 압력측정의 불확실성은  $\pm 1\%$ 이다.

Table 1 Geometrical dimensions of wire-coil-inserted tubes

Tube Type	$D_w$ (mm)	$t$ (mm)	$p$ (mm)	$\alpha$ (deg)	$p/D_{DV}$
S1(Smooth,○)	11.00	-	-	-	-
S2(Smooth,●)	13.88	-	-	-	-
W1(△)	11.00	2	20	53	1.82
W2(□)	11.00	2	15	64	1.36
W3(☆)	11.00	2	10	72	0.91
W4(◇)	11.00	2	6	79	0.55
W5(▲)	13.88	3	23	60	1.66
W6(■)	13.88	3	18	66	1.30
W7(★)	13.88	3	15	69	1.08
W8(◆)	13.88	3	12	73	0.86

실험자료 획득장치는 데이터 로거(data logger)와 개인용 컴퓨터(personal computer)로 구성되어 있으며 데이터 로거는 Fluke사의 NetDAQ 2640A로 100Hz의 표본회수(sampling frequency)와  $\pm 10$  볼트(volts)의 입력범위를 가진다. 개인용 컴퓨터는 데이터 로거에서 획득한 실험자료를 전송받아 열전달계수와 마찰계수등을 계산하고 저장하는데 사용하였다.

## 2.2 실험 방법 및 실험자료 해석

와이어코일 인서트를 사용한 열전달 촉진관에 대한 열전달 및 압력강하 특성 실험을 Table 2에 나타난 바와 같이 다양한 조건에서 수행하였다.

시험부 내부관에는 칠러(chiller)에 의해 10°C로 냉각되어지는 저온의 순수물 또는 에틸렌글리콜 수용액을, 외부관에는 온수보일러(boiler)에 의해 40°C로 가열되어지는 고온의 순수물 또는 에틸렌글리콜수용액을 대향류(counter-current flow)로 순환시켜 열전달 및 압력강하 특성실험을 수행하였다. 시험부 외부관을 순환하는 유체의 유량을 일정하게 고정시킨 후 내부관을 순환하는 유체의 유량을 유량조절밸브(control valve)와 바이패스 밸브(by-pass valve)를 통해 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 유체의 입·출구온도, 벽면온도, 압력, 유량에 대한 정상치를 얻기 위하여 시험부 내에서 열수력학적으로 정상상태에 도달한지를 확인하였는데 시스템이 정상상태에 도달하기 위해서는 약 2~3시간 정도가 소요되었다. 이렇게 획득한 실험자료는 자료획득장치(data logger)를

Table 2 Experimental conditions

Factors	Smooth tube		Smooth tube + Wire coil inserts	
	Inner side (E-G 수용액)	Inner side (Water)	Inner side (E-G 수용액)	Inner side (Water)
Inlet pressure (Mpa)	0.14~0.26	0.12~0.25	0.14~0.28	0.13~0.27
Inlet mass flux (kg/m <sup>2</sup> s)	490~1,650	312~1,600	460~1490	265~1,490
Inlet temp. (°C)	13.5~16.8	12.8~17.4	13.5~18.4	13.3~18.7
Pr	39~42	8~9	39~42	8~9
Re	1,320 ~4,120	3,700 ~17,000	1,168 ~4,120	3,300 ~17,500

통해 개인용 컴퓨터와 연결하여 저장하였다.

본 실험에서 사용된 작동유체의 물성치는 ASHRAE Handbook<sup>(12)</sup>에서 제시한 자료를 사용하였다. 실험자료의 정확성을 기하기 위하여 관 내외부의 에너지평형식에 따른 오차가  $\pm 5.0\%$ 범위내의 실험자료만 열전달 및 압력강하 특성분석에 사용하였다. 본 연구에서 사용한 2중관 열교환기내의 내부 열전달계수는 식(1)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$h = \left[ \frac{\pi D_{inner} L (T_w - T_c)}{Q} - \frac{D_{inner}}{2k_w} \ln \left( \frac{D_{outer}}{D_{inner}} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서  $T_w$ 는 평균벽면온도이고,  $T_c$ 는 내부 작동유체의 평균온도이다. 식(1)에서 열전달을  $Q$ 는 에너지 평형식, 식(2)에서 계산할 수 있다.

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

$T_{hf}$ 와  $G_h$ 는 각각 외부관 작동유체의 평균온도와 질량유량이며, 아래첨자  $i$ 와  $o$ 는 입, 출구를 의미한다. 그리고 마찰계수는 Darcy 마찰계수<sup>(13)</sup>를 사용하였는데, 식(3)과 같다.

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

본 연구에서 사용한 누셀트수, 마찰계수, 레이놀즈수등은 체적수력직경(volumetric hydraulic diameter)<sup>(14)</sup>을 기준으로 한 것이다.

Table 3 A summary of other correlations used for comparison

Autors	Medium	Re	Tube type	Correlation eqn.
Present study	Ethylene glycol & Water sol.(50%)	1,168-4,120	Wire coil inserts	$Nu = 0.125 \left( \frac{D}{D_{DV}} \right)^{-0.12} Re_{DV}^{0.7} Pr^{0.4}$
	Water	3'300-17,500		
Hong & Bergles (1976)	Ethylene glycol	13-390	Twisted-tape inserts	$Nu = 5.172 [1 + 5.484 \times 10^{-3} Pr^{0.7} (Re/y)^{1.25}]^{0.5}$
	Water	83-2,460		
Nag & Raja Rao(1987)	40% Glycerol	3,000-12,000	Ribbon coil inserts	$Nu = 0.0096 Re^{0.97} Pr^{0.03} (\alpha = 51^\circ)$
				$Nu = 0.0125 Re^{0.99} Pr^{0.3} (\alpha = 66^\circ)$
				$Nu = 0.0132 Re^{0.99} Pr^{0.3} (\alpha = 79^\circ)$
	Water	10,000-40,000	$Nu = 0.031 Re^{0.8} Pr^{0.3} (\alpha = 51^\circ)$	
				$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.3} (\alpha = 66^\circ)$
				$Nu = 0.050 Re^{0.8} Pr^{0.3} (\alpha = 79^\circ)$
Uttarwar & Raja Rao(1985)	Servotherm oil	30-700	Wire coil inserts	$Nu = 1.65 \tan \alpha (Re)^{0.25} (\tan \alpha)^{-0.38} Pr^{0.35} \phi$
Sethumadhavan & Raja Rao (1983)	Water	8,000-80,000	Wire coil inserts	Not available (Graphic form)
	50% Glycerol	3,000-15,000		
Kumar & Judd (1970)	Water	6,000-100,000	Wire coil inserts	$Nu = 0.175 \left( \frac{D}{D_{inner}} \right)^{-0.35} Re^{0.7} Pr^{\frac{1}{3}}$
Manglik & Bergles (1992)	Ethylene glycol	300-4000	Twisted-tape inserts	Not available (Graphic form)
	Water	800-35,000		

3. 실험 결과 및 토의

평활관에 와이어코일을 삽입한 열전달 촉진관에 대하여 열전달 및 압력강하 특성을 분석하고 그 결과를 제시하였다. 그리고 Table 3에 요약한 타 연구결과와 비교를 통하여 이 연구에서 얻은 열전달계수의 타당성과 와이어코일 인서트법의 수월성을 검토하였다. 실험 범위는 순수한 물일 경우 레이놀즈 수가 3,300~17,500 이며 에틸렌글리콜 수용액의 경우, 레이놀즈수가 1,168~4,120이다.

3.1 마찰계수 특성

Fig. 3과 Fig. 4는 에틸렌글리콜 수용액과 순수한 물을 매질로 하였을 경우, 열전달촉진관에 대한 마찰계수를 각각 레이놀즈수의 함수로 도시한 결과이다. 여기에서 기호로 나타난 형식은 Table 1에 표기된 시험관을 의미한다. 열전달촉진법을 사용할 때 마찰계수의 증가는 항상 관찰되는 것

으로 와이어코일의 경우 그 증가율은 선회유동기구법 가운데 비교적 낮은 것으로 알려져 있다.

이 그림에 나타난 바와 같이 열전달 촉진관은 와이어코일 인서트의 피치가 가장 큰 경우(Δ), 레이놀즈수가 증대됨에 따라 마찰계수가 평활관보다 6~8배정도 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과를 와이어코일 인서트의 피치가 가장 작은 경우에 대해서(◇) Hideo등<sup>(15)</sup>(1994)의 결과와 비교하였는데, 약 0.5~1.5배 정도 높게 나타났다. 이 실험에서 마찰계수가 비교적 높게 나타난 것은 와이어코일이 부분적으로 관벽면에 완전히 밀착되지 않았기 때문일 것으로 추정된다. Figs. 3~4에서 보는 바와 같이 와이어코일 인서트의 경사각이 높아질수록 마찰계수가 점차적으로 증가함을 알 수 있는데, 이는 시험부 내부관 단위 길이당 와이어코일 인서트가 차지하는 면적이 증가하고, 와이어코일 인서트의 삽입으로 수력직경비가 감소하였으며, 와이어코일 인서트를 관벽면에 밀착시킴으로써 해서 표면거칠기가 증가하였기 때문이다.

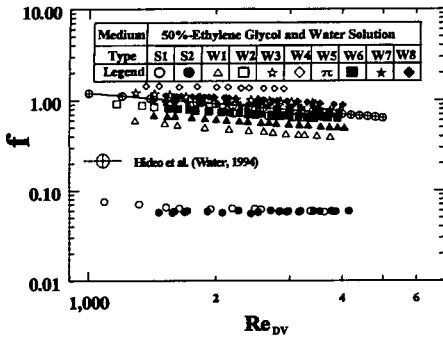


Fig 3. Friction factors obtained in the present study using E-G & water solution.

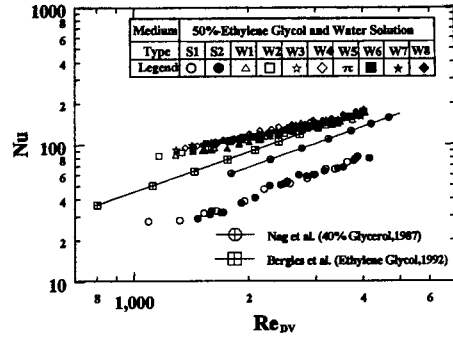


Fig 5. Nusselt numbers obtained in the present study using E-G & water solution.

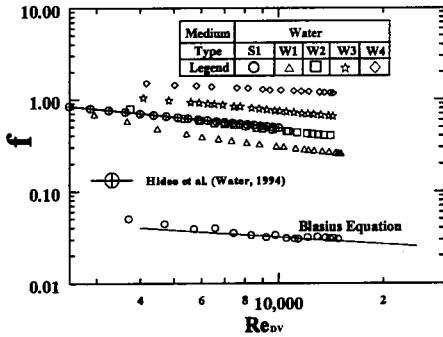


Fig 4. Friction factors obtained in the present study using pure water.

3.2 열전달 특성

Fig. 5는 에틸렌글리콜 수용액을 매질로 한 경우에 열전달 특성을 레이놀즈 수에 대해서 나타낸 그림이다. 그림에서 제시된 바와 같이 열전달 촉진관이 평활관에 비해서 200~300%정도 열전달이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 와이어코일 인서트 가 관내에 선회유동을 유발시켜 유체의 혼합효과를 극대화시키는 역할을 하였고, 관 내부 벽면의 거칠기를 증가시키고, 벽면근처에 형성되어있는 열경계층을 파괴시킴으로써 열전달을 촉진시켰기 때문이다. 한편, 와이어 코일의 피치가 감소함에 따라, 즉 경사각의 증가에 따른 열전달 성능향상은 향상되나 상대적으로 미약한 것으로 나타났다.

이 연구결과는 Manglik와 Bergles(1992)가 비틀림 테이프를 삽입하여 에틸렌글리콜을 매질로

한 열전달 촉진실험 결과와, Nag와 Raja Rao(1987)의 리본코일을 삽입하여 40% 글리세롤을 매질로 한 결과보다 열전달 촉진이 비교적 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 6은 평활관과 4가지의 열전달 촉진관에 대해서 순수한 물을 매질로 하였을 때의 열전달 특성을 나타낸 그림이다. 평활관에 비해서 약 100~200%정도의 열전달 성능 향상이 발생하였으나, 와이어코일의 피치변화에 따른 열전달 성능향상은 있으나 크게 두드러지지 않음을 알 수 있다. Figs. 5~6의 결과와 관련하여 와이어코일의 경사각이 53(△)~60° (▲) 일때 가장 뛰어난 열전달 촉진 성능향상을 나타내고, 경사각이 증가할수록 열전달 촉진성능 향상은 미약하게 나타났다. 한편, Kummer와 Judd(1970)는 작동유체를 물로 하여 레이놀즈수 6,000~100,000의 범위에서 실험을 수행하여, 와이어코일의 피치와 직경비를 고려한 상관식을 제안하였다. 따라서, 본 연구에서도 와이어코일의 피치와 직경비를 고려하여, 열교환기의기초설계자료로 활용할 수 있는 열전달 촉진관에 대한 열전달 상관식을 식(4)와 같이 제안하였다.

$$Nu = 0.125 \left( \frac{p}{D_{DV}} \right)^{-0.12} Re^{0.7} Pr^{0.4} \quad (4)$$

Fig. 7은 식(4)에서 제안된 상관식이 실험결과와 잘 일치함을 대표적인 경우에 대해서 표시한 그림이다. 제안된 상관식과 실험자료들은 평균적으로 ±8%이내의 오차를 가진다.

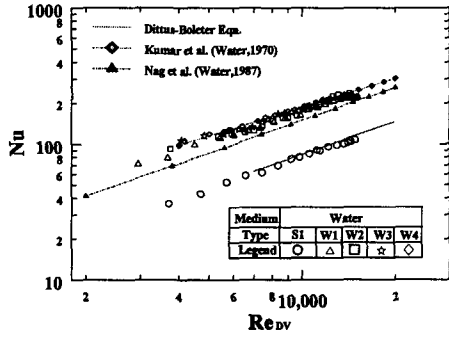


Fig 6. Nusselt numbers obtained in the present study using pure water.

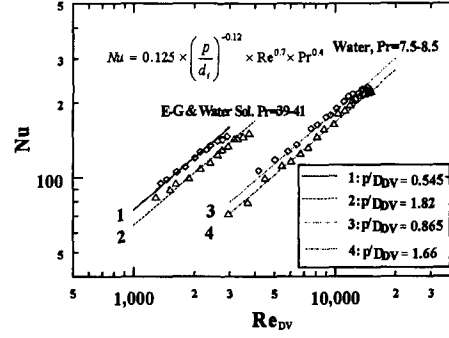


Fig. 7 A unified form of correlations for the present data.

3.3 Wire Coil Inserts의 성능 평가

많은 연구자들이 열교환기의 성능향상과 운전 비용을 경감시키기 위해 열전달 촉진법에 대한 연구를 수행하였으며, 제안된 열전달 촉진법의 성능평가는 주로 열전달량과 압력강하에 초점이 맞추어졌다. 열전달 촉진법의 효율성과 최적유동 조건을 결정하는 문제는 촉진법의 효과적인 활용을 위하여 필수적으로 연구되어야 한다.

Bejan(1984)<sup>(17)</sup>은 열역학 제 1, 2법칙을 이용하여 열전달 촉진의 성능평가를 시도하였는 바, 이는 열전달시에 필수적으로 동반되는 비가역성(irreversibility)에 기인한 엔트로피 발생(entropy generation)을 고려하여 열전달 촉진의 성능평가를 제시하였다.

Prasad와 Shen(1993)은 이를 이용하여 열전달 촉진의 성능평가에 엑서지 해석(exergy analysis)을 시도하였다. 즉, 엑서지 소멸(exergy destruction)이 최소가 되는 부분에서 시스템의 열역학적 최적유동조건을 찾고자 하였다. 다음 식들은 Prasad와 Shen(1993)이 엑서지 해석에 이용한 식들로 열전달과 압력강하에 의한 엑서지 소멸을 함께 고려하여 무차원 형태(nondimensional form)로 표현한 것이다. 본 연구에서 대상으로 삼은 와이어코일 삽입법의 최적유동조건을 찾는 데 이 방법을 이용하여 해석하였다.

엑서지(exergy)는 식(5)와 같이 정의된다.

$$\psi = h - h_o - T_o (s - s_o) \quad (5)$$

엑서지(exergy)가 온도와 압력만의 함수라 가정하면, 엑서지의 미소변화  $d\psi$ 는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$d\psi = \left( \frac{\partial \psi}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial \psi}{\partial P} \right)_T dP \quad (6)$$

열역학적 관계식과 엔트로피의 정의를 이용하여 식(6)은 식(7)과 같이 정리할 수 있다.

$$d\psi = c_p \left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) dT + \frac{v}{T} T_o dP \quad (7)$$

한편, 미소요소 길이  $dx$ 에 대한 엑서지 소멸은 입,출구의 엑서지 변화량과 벽면을 통한 엑서지 출입의 합으로 생각할 수 있으므로 식 (8)로 엑서지 소멸을 표현할 수 있다.

$$d\psi = G\psi_x - G\psi_{x+\Delta x} - \delta Q \left( \frac{T_w - T_o}{T_w} \right) \quad (8)$$

식(8)을 이용해 재정리하면,

$$d\psi = GT_o \left[ c_p \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_w} \right) dT - \frac{dP}{\rho T} \right] \quad (9)$$

식(9)의 엑서지 소멸을 무차원 형태로 나타내면,

$$\Delta\psi^* = \frac{\Delta\psi}{GT_o c_p} \quad (10)$$

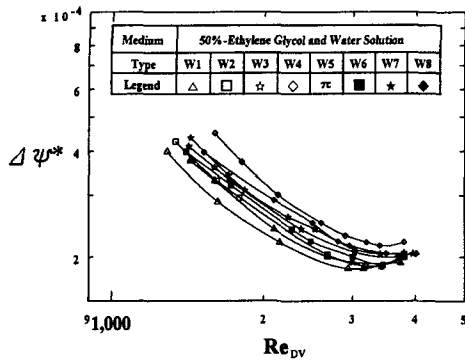


Fig. 8 Dimensionless exergy destruction for the data of E-G & water solution.

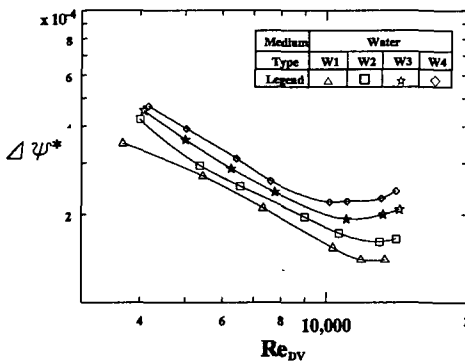


Fig. 9 Dimensionless exergy destruction for the data of pure water.

Fig. 8은 본 연구에서 얻은 자료를 바탕으로 에틸렌글리콜 수용액의 레이놀즈수에 대한 엑서지 소멸을 무차원 형태로 표현한 그림이다. 작은 레이놀즈수 영역에서는 각각의 열전달 촉진관에 대해서 무차원 엑서지 소멸( $\Delta\psi^*$ )은 완만하게 감소하는데, 이 영역에서는 유동마찰에 의한 엑서지소멸의 증가보다 열전달 촉진에 의한 엑서지소멸의 감소효과가 더 현저하기 때문이다. 반면, 레이놀즈수 3,500이상에서는 열전달 촉진에 의한 엑서지소멸의 감소보다는 유동마찰에 의한 엑서지 소멸의 증가효과가 더 뚜렷하므로 무차원 엑서지소멸이 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 엑서지 소멸량이 최소인 레이놀즈수 약 3,500을 에틸렌글리콜 수용액 열전달 촉진관의 최적운전조건으로 판단할 수 있다. Fig. 9는 물의

레이놀즈수에 대한 엑서지 소멸을 무차원 형태로 표현한 그림인데, 레이놀즈수 약 13,000을 최적운전조건으로 판단하였다. 따라서 이 연구에서 사용한 와이어코일의 치수에 대하여 최적운전조건은 에틸렌글리콜 수용액의 경우 레이놀즈수가 3,500 부근, 순수물의 경우 13,000 부근이라고 생각할 수 있으며 이 조건이 이 방법을 사용할 때 가장 효과적이라고 말할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 와이어코일 삽입법을 이용한 열전달 촉진관에서의 열전달 촉진 및 압력강하특성을 규명하기 위해 와이어코일을 삽입한 열전달 촉진관을 제작하였고, 물과 50%에틸렌글리콜 수용액을 작동유체로 사용하였다. 실험조건에 대한 성능실험 수행 결과, 마찰계수가 평활관보다 와이어코일 인서트의 피치가 가장 큰 경우에 대해서 약 6~8배 정도 높게 나타났다. 또한, 열전달 성능향상은 에틸렌글리콜 수용액의 경우, 200~300%, 물의 경우에는 100~200% 높게 발생하였다. 한편, 본 연구에서는 엑서지 해석을 통하여 열전달 촉진관에 대한 전열성능을 평가하였는데, 에틸렌글리콜 수용액일 때는 레이놀즈수 3,500, 물일 때는 13,000을 열역학적 최적운전조건으로 판단하였다. 또, 본 연구결과를 기초로 와이어코일 삽입법을 이용한 열전달 촉진관에 대한 상관식을 제안하였다. 제안된 상관식은 실험자료와 잘 일치하였으며, 열교환기 설계의 기초자료로 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 연구는 에너지관리공단 R&D 센터의 '97 에너지기술 학술진흥사업에 따른 연구비지원에 의하여 이루어졌습니다. 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Reay, D. A., 1991, 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.
2. Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-32.
3. Lee, S. C., 1997, Heat Transfer Enhancement Techniques and their Applications, Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting C, kwang-jupp, 32-39.
4. Bergles, A. E., Nirmalan, V., Junkan, G. H. and Webb, R. L., 1983, Bibliography on Augmentation of Convective Heat and Mass Transfer II, Heat Transfer Laboratory Report HTL-31, ISU-ERI-Ames-84221, Iowa State Univ., December.
5. Uttarwar. S. B. and Raja Rao, M., 1985, Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts, J. Heat Transfer, Vol. 107, pp. 930-935.
6. Sethumadahavan. R. and Raja Rao, M., 1983, 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.
7. Hong, S. W. and Bergles, A. E., 1976 Augmentation of Laminar Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Twisted-Tape Inserts, Journal of Heat Transfer, Vol. 98, pp. 251-256.
8. Nag, S. and Raja Rao, M., 1987, Forced convection heat transfer in smooth tubes roughened by helically coiled ribbons, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 7, pp. 1541-1544.
9. Magnolia, R. M. and Bergles, A. E., 1992 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.
10. Prasad, R. C. and Jihua Shen, 1993, Performance evaluation using exergy analysis-application to wire-coil inserts in forced convection heat transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 15, pp. 2297-2303.
11. Prasad, R. C. and Jihua Shen, 1993, Performance evaluation of convective heat transfer enhancement devices using exergy analysis, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 36, No. 17, pp. 4193-4197.
12. ASHRAE, 1997, ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapt. 20, pp. 20.1-20.10.
13. White, M. F., 1987, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York, pp. 294-371.
14. Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York, pp. 188-191.
15. Hideo Inaba, Koichi Ozaki and Shinichi Kanaoka, 1994, A Fundamental Study of Heat Transfer Enhancement and flow Drag Reduction in Tubes by means Wire Coil Insert, Transactions of JSME. Vol. 60, No. 569, pp. 240-247.
16. Kummar, R. & Judd, R. L., 1970, Heat Transfer with Coiled Wire Turbulance Promoters, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 48, pp. 378-383.
17. Bejan, A., 1984, Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow, Wiley. New York, pp.98-134.