

세관 내 액단상 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구

홍진우* · 정재천* · 김종렬** · 노건상** · 구학근** · 오후규***

Study on the Single-Phase Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R-718 in Small Diameter Tubes

Hong Jin Woo, Jeong Jae Cheon, Kim Jong Ryeol, Roh Geon Sang,
Ku Hag Geun and Oh Hoo Kyu

Key Words: Single-Phase Heat Transfer(액단상 열전달), Small Diameter Tube(세관), R-718(물)
Pressure Drop(압력 강하), Heat Pump(열펌프)

Abstract

Single-phase heat transfer coefficients and pressure drops of R-22 were measured in smooth, horizontal copper tubes with inner diameters of 3.36 mm, 5.35 mm, 6.54 mm and 8.12 mm, respectively. The experiments were conducted in the closed loop, which was driven by a magnetic gear pump. Data are presented for the following range of variables : Reynolds from 1000 to 20000.

Single-phase heat transfer coefficients increased by 10~30 % as the inner diameter of tube was reduced and it was found that a well-known previous correlation, Gnielinski's correlation, was not suitable for the small diameter tubes. But the pressure drop in the small diameter tubes have been shown slightly deviations with Blaius' correlation. Based on an analogy between heat and mass transfer, the new heat transfer correlation is proposed to predict the experimental data successfully.

기호설명

A : 전열 면적[m²]
 c_p : 비열[kJ/kg · K]
 d : 관내경[m]
 dz : 소구간 길이 [m]
 G : 질량 유속[kg/m² · s]
 h : 열전달 계수[kW/m² · K]
 κ : 열전도도[kW/(m · K)]
 L : 시험부 길이[m]
 n : 소구관 번호[/]
 p : 압력[kg/cm²]

q : 열유속[kW/m²]
 Q : 전열량[kW]
 μ : 점도[Pa · s]
 ρ : 밀도[kg/m³]

하첨자

c : 냉각수
 cal : 계산값
 exp : 실험값
 ID : 내경
 in : 입구
 L : 국소
 l : 액체
 m : 평균
 OD : 외경
 out : 출구

* 회원, (주)한서엔지니어링
 E-mail : jw4hong@orgio.net
 TEL : (051)831-1442 FAX : (051)831-0766
 ** 회원, 동명대학 가스냉동과
 *** 회원, 부경대학교 냉동공조공학과

r : 냉매
 w : 관벽
 w_i : 관내벽
 w_o : 관외벽

무차원수

Pr : Prandtl 수, $\left[\frac{c_p \mu}{k} \right]$

Re : Reynolds 수, $\left[\frac{G d}{\mu} \right]$

St : Stanton 수, $\left[\frac{Nu}{Re Pr} \right]$

1. 서론

최근 들어 세관 열교환기에 대한 관심이 고조되면서, 세관 내 액단상 열전달 및 압력 강하 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 지금까지의 연구 성과는 세관 내 열전달 및 압력 강하 특성을 명확히 밝혀내지 못하고 있는 실정이다.⁽¹⁾ 세관 내 액단상 열전달 및 압력 강하 특성에 관련한 주요한 연구로는; Mishima-Hibiki⁽²⁾는 다양한 세관(8가지 종류, 수력직경 1 ~ 4 mm)에서 물/공기를 이용하여 종래의 압력 강하에 관한 예측식과 비교 검토하였다. 실험 결과로부터 단상류의 경우는 종래의 Blasius⁽³⁾ 식과 잘 일치하였으나, 이상 유동의 경우는 Lockhart-Martinelli⁽⁴⁾ 변수와 마찰 손실 배수 ϕ^2 의 관계를 기본으로 하는 종래의 압력강하 상관식과 유사하다는 가정하에, 종래의 Chisholm⁽⁵⁾의 상관식을 이용한 예측식을 제안하였다. Peng-Peterson⁽⁶⁾은 물을 이용하여 수력 직경 0.133 ~ 0.367 mm 인 장방향 관에서 강제 대류 단상 유동 및 열전달 특성에 대한 실험을 하였다. 실험을 통해서, 미세 유로의 형상이 강제 대류 유동 및 열전달 특성에 중요한 영향을 미치는 것을 보고하였다. 그리고 층류와 난류 천이 영역 내에서 Nu 수와 Re 수의 관계가 상당히 복잡함을 밝히고, 이들 영역 내에서 Re 수가 증가함에 따라 Nu 수가 감소하는 특이한 열전달 특성을 보고하였다. 그리고 유로 형상의 영향을 고려한 여러 가지 새로운 인자(D_h/W_c , H/W , Z)를 도입하여 그의 실험 범위 내에서만 적용할 수 있는 단

상 열전달 상관식을 제안하였다. 또한, Tso-Mahulikar⁽⁷⁾은 종래의 Peng-Peterson⁽⁶⁾의 연구에서 밝힌, 층류에서 난류로 천이하는 영역에서 발생하는 특이한 열전달 현상을 종래의 Nu 수와 Re 수의 관계로는 설명할 수 없음을 밝히고 있다. 그리고 새로운 무차원수인 Brikman 수, Br 를 제안하여 이 특이한 열전달 현상을 설명하려고 시도하였다. Brikman 수는 미소 유로 내 대류 열전달에 영향을 미치는 변수들을 무차원화하여 나타낸 수인데, 그들은 이 수를 이용하여 장방향 세관에 적용할 수 있는 액단상 열전달 상관식을 제안하였다. 한편, Adams 등⁽⁸⁾은 관경이 0.76 ~ 1.09 mm 인 평활 원형관 내에서 물을 이용하여 단상 강제 대류 실험을 실시하였다. 실험을 통해서 얻은 열전달 계수 및 Nu 수는 종래의 Gnielinski⁽⁹⁾ 상관식으로 예측한 값보다 높은 것을 보고하였다. 그리고 Gnielinski 상관식을 수정하여 세관에 적용할 수 있는 액단상 열전달 상관식을 제안하였다.

본고에서는 R-718을 작동 유체로 하여, 세관(내경 3.36 mm, 5.35 mm, 6.54 mm 그리고 8.12 mm)에서 액단상 열전달 및 압력 강하 특성을 분석하여 세관 열교환기 기초 설계 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치는 냉매(온수)가 순환되는 경로와 브라인(냉수)이 순환되는 경로로 구성하였다. 냉매는 자기 펌프(Tuthill pump 사), 질량 유량계(Oval 사) 및 항온조에서 일정한 유량과 온도로 조절되어 시험부로 유입 및 냉각된다. 시험부를 나온 냉매는 수액기를 통해 다시 자기 펌프로 유입된다. 시험부에 유입되는 브라인은 냉동기 유니트에서 일정한 온도와 유량으로 조절된다. 시험부는 내관과 외관으로 구성된 대향류 이중관형 열교환기이다. 그리고 냉매가 흐르는 내관은 내경 3.36 mm, 5.35 mm, 6.54 mm 그리고 8.12 mm 이고 관벽 두께는 0.7 mm 로 동일한 수평 평활 동관이며, 전체 관 길이는 3000 mm 이다. 내관은 관 길이 방향으로 500 mm 등 간격으로 6 개의 소구간으로 나누어져 있으며 각 소구간에는 표준 온도계로 보정된 T형 열전대를 사용하여 냉매와 내관 외벽면 상·측·하부 온도를 측정할 수 있도록 했다. 그리고 열전

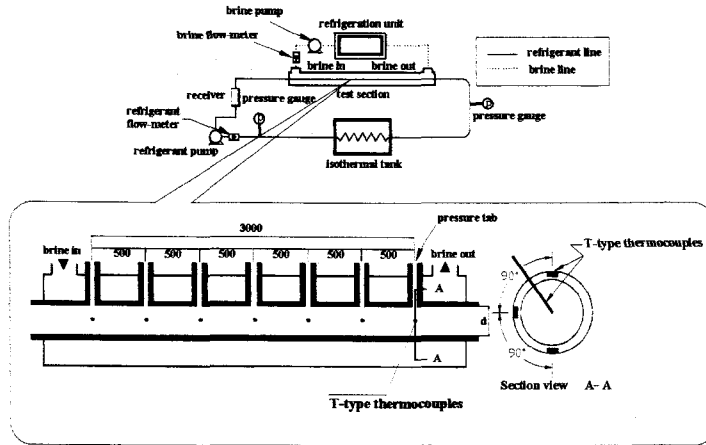


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus and detail of test section for single-phase(liquid) heat transfer and pressure drop.

대에서 측정된 데이터는 데이터 로그(Yokogawa 사)의 단자에 연결되어 바로 PC에서 처리하도록 하였다. 시험부 입·출구 및 각 소구간 내 입·출구에서 차압을 측정할 수 있도록 압력, 차압 변환기(Druck 사) 및 압력 텀을 설치하였으며 모든 측정은 냉매의 온도, 압력 및 유량 등이 일정하게 유지되는 정상 상태 하에서 30 회 이상 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 데이터 처리

본 실험에서 사용한 냉매(R-718)에 대한 물성치는 "Handbook of Thermodynamic Table"⁽¹⁰⁾을 참조하였으며, Table 1에는 실험 조건을 나타내었다. 그리고 액단상 열전달 및 압력 강하 실험 데이터의 분석에는 다음과 같은 계산식을 사용하였다. 먼저 시험부 소구간에서, 냉매가 내관 내벽면에 공급하는 열유속 q_r [kW/m²]은 아래와 같은 식 (1)으로부터 계산하였다.

$$q_r = \frac{Q_r}{\pi \cdot d_{IN} \cdot dz} \quad (1)$$

여기서, d_{IN} 는 내관의 관 내경 [m]이고, dz 는 소구간의 길이 [m]를 나타낸다. 그리고 냉매가

내관 내벽면에 공급하는 전열량 Q_r [kW]는 식 (2)로 구하며, 내관 원주 방향의 관내 국소 열전달 계수 $h_{r,L}$ [kW/m²·K]은 식 (3)으로 계산한다.

$$Q_r = M_r \cdot c_{p,r} \int_{T_{r,in}}^{T_{r,out}} dz \quad (2)$$

$$h_{r,L} = \frac{q_r}{(T_r - T_{wi})} \quad (3)$$

여기서, M_r 은 냉매(온수)의 질량 유량 [kg/s], $T_{r,in}$ 과 $T_{r,out}$ 는 냉매의 입구와 출구 온도 [K], $c_{p,r}$ 은 냉매의 비열 [kJ/kg·K] 그리고 T_r 은 내관을 흐르는 관주 방향의 냉매 온도 분포가 동일하다는 가정하에서, 실험에서 측정된 냉매의 온도 [K]를 나타내고, T_{wi} 는 냉매와 접하고 있는 내관 내벽면 온도[K]를 나타내고 있다. 그러나 내관 내벽면 온도 T_{wi} 는 직접적으로 실험을 통해서 측정을 하기는 매우 어렵다. 그래서 내관벽에서의 열전달이 1차원 정상 상태 전도로 이루어진다고 가정하고, 1차원 정상 상태 전도 방정식인 식 (4)를 사용하여 내관 내벽면 온도 T_{wi} 를 구하였다.

$$T_{wi} = T_{wo} + \frac{Q_r \cdot \ln\left(\frac{d_{OD}}{d_{IN}}\right)}{2\pi \cdot k_w \cdot dz} \quad (4)$$

Table 1 Experimental condition for single-phase (liquid) heat transfer and pressure drop

Test section	Horizontal copper tube
Temperature of refrigerant(Hot water)	50 °C
Temperature of brine(Cool water)	10 °C
I.D. of inner tube (mm)	3.36, 5.35, 6.54, 8.12
Reynolds number of refrigerant	1000 ~ 20000
Mass flow rate of cool brine	450 kg/h

여기서, T_{wo} 는 실험에서 측정된 내관 외벽면 상, 측, 하부의 표면 온도를 평균한 온도 [K] 이고, d_{OD} 와 d_{ID} 는 내관의 외경 [m]과 내경 [m]이다. 또 k_w 는 동관의 열전도율 [kW/m·K]이다. 그리고 평균 열전달 계수 h_m 은 식 (5)로 계산할 수 있다.

$$h_m = \sum \frac{h_{r,L}}{n} \quad (5)$$

여기서, $h_{r,L}$ 은 식 (3)으로부터 계산되는 소구간의 국소 대류 열전달 계수 [kW/m²·K]이며 n 은 소구간의 수이다. 그리고 실험을 통해서 얻은 냉매의 체적 유량 V_r [m³/h]과 내관 단면적으로부터, 냉매의 평균 유속 u_r [m/s]을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$u_r = \frac{4 V_r}{(\pi d_{ID}^2)} \quad (6)$$

관 내 단상류에 대한 마찰 압력 강하는 Darcy-Weisbach⁽¹¹⁾가 제안한 식 (7)로 계산하였다.

$$dP_r = f \cdot \frac{dz}{dN} \cdot \frac{\rho_r u_r^2}{2} \quad (7)$$

여기서, dP_r 은 소구간내 마찰 압력 손실 [Pa]이고 f 는 마찰 인자(friction factor)이며 ρ_r 은 냉매

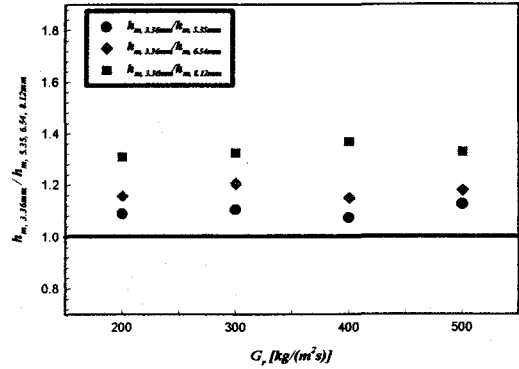


Fig. 2 Comparison of mean heat transfer coefficients.

의 밀도 [kg/m³]이다.

3.2 세관 내 액단상 열전달 및 압력 강하

액단상 열전달 및 압력 강하 특성에 대한 연구는 단상 열교환기 설계시 필요한 기초 자료가 될 뿐만 아니라 이상류 열교환기(증발기, 응축기) 설계 시에도 매우 중요한 자료가 된다.

Fig. 2는 내경 3.36 mm 관에서 얻은 평균 열전달 계수 h_m 을 나머지 세가지 관경에서 얻은 평균 열전달 계수와 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 종축은 냉매의 질량 유속 G_r 을 나타내고, 횡축은 내경 3.36 mm 관에서 얻은 h_m 과 다른 세가지 관경에서 얻은 h_m 과의 비를 나타내고 있는데, 3.36 mm 관의 h_m 이 다른 관경의 h_m 보다 10 ~ 30 % 정도 높았다. 특히, 3.36 mm 관의 열전달 성능은 8.12 mm 관의 열전달 성능에 비해서 성능 항상 폭이 두드러졌다. 이는 관경의 세관화로 인한 열전달 성능 향상 효과 때문인 것으로 보여지는데, 이런 관경의 세관화가 성능 향상에 미치는 원인에 대해서는 아직 명확하게 밝혀지지 못한 것으로 알려져 있다. 하지만 세관 내 단상 유동은 종래 대구경관 내 단상 유동에 비해, 난류화가 촉진되는 현상으로 이러한 성능 향상을 설명할 수 있을 것으로 여겨진다.

열전달 특성을 규명하는데 있어서, 실제 실험 결과와 종래 제안된 상관식으로 예측한 값을 서로 비교하는 방법은 효과적인 방법으로 알려져 있다. 종래 대구경관에서 제안된 액단상 열전달 계수에 관한 상관식으로는 대표적으로 Dittus-Boelter⁽¹²⁾, Sieder-Tate⁽¹³⁾, Petukov-Popov⁽¹⁴⁾와 Gnielinski⁽⁹⁾ 등이 있다. 그리고 최근 들어, 세관

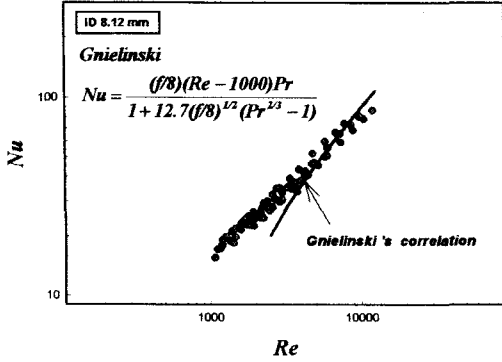


Fig. 3 Comparison of Nu_{exp} and Nu_{cal} using Gnielinski's correlation in ID 8.12 mm tube.

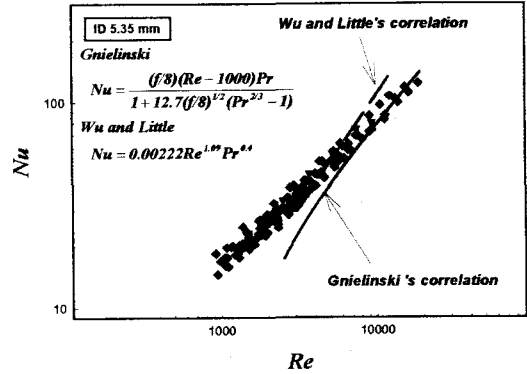


Fig. 5 Comparison of Nu_{exp} and Nu_{cal} using Gnielinski's and Wu-Little's correlations in ID 5.35 mm tube.

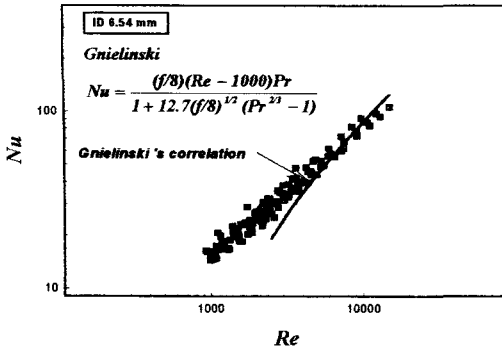


Fig. 4 Comparison of Nu_{exp} and Nu_{cal} using Gnielinski's correlation in ID 6.54 mm tube.

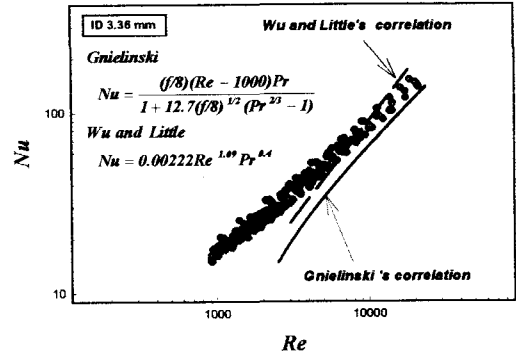


Fig. 6 Comparison of Nu_{exp} and Nu_{cal} using Gnielinski's and Wu-Little's correlations in ID 3.36 mm tube.

에서 제안된 상관식으로는 Peng-Peterson⁽⁶⁾, Incropera⁽¹⁵⁾, Peng-Wang⁽¹⁶⁾, 그리고 Wu-Little⁽¹⁷⁾ 등이 있다. 이 중에서, Gnielinski 상관식과 Wu-Little의 상관식과 본 실험 결과를 비교·검토하였다. 먼저, Gnielinski 상관식은 종래 평활 원형관 내 난류 영역에서 폭 넓게 적용 가능한 식으로 알려져 있으며 식 (8)로 나타낸다.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (8)$$

여기서, Pr 수와 Re 수는 식 (9), 식 (10)으로 구하며, 마찰 인자(Friction Factor) f 는 식 (11)로 계산되는 Filonenko⁽¹⁸⁾의 식으로 정의된다.

$$Pr = \left(\frac{c_p \mu}{k} \right), \quad 0.5 < Pr < 2000 \quad (9)$$

$$Re = \left(\frac{G d_{ID}}{\mu} \right), \quad 2.3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6 \quad (10)$$

$$f = (1.82 \log(Re) - 1.64)^{-2} \quad (11)$$

그리고 미세 원형관과 다채널 관에서 얻은 실험 결과로부터 제안된 Wu-Little의 상관식은 폭넓은 적용 범위를 가지며, 식 (12)로 계산된다.

$$Nu = 0.00222Re^{1.09}Pr^{0.4}, \quad 3000 < Re \quad (12)$$

Fig. 3과 4는 각각 내경 8.12 mm와 6.54 mm 관에서 얻은 평균 열전달 계수 h_m 과 Gnielinski 상관식으로 구한 예측치와 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, Gnielinski 상관식은 내경 8.12 mm 관에서는 넓은 난류 영역 $4000 < Re < 8000$, 내경 6.54 mm 관에서는 $6000 < Re < 8000$ 에서 실험 결과를 잘 예측하고 있지만, Re 수 2000 ~ 4000에서는 실험 결과보다 과소 예측하고 있었다. 그리고 Fig. 5와 6은 각각 내경 5.35 mm와 3.36 mm 관에서 얻은 평균 열전달 계수 h_m 를 Gnielinski 상관식과 Wu-Little 상관식과 비교하여 나타내었다. 내경 5.35 mm 관에서는 Re 수 8000 ~ 10000에서만 Gnielinski 상관식과 좋은 일치를 나타내고 있고, 내경 3.36 mm 관의 경우는 전체 실험 범위에서 Gnielinski 상관식과 일치하지 않았다. 따라서, Gnielinski 상관식은 내경 5.35 mm와 3.36 mm 관경에서 Gnielinski의 상관식을 적용하기는 매우 힘들 것으로 판단되며, 저 Re 수 영역($2000 < Re < 4000$)의 세관 내 열전달 특성을 예측하지 못하는 것으로 보인다. 이는 종래 대구경관 내 열전달 실험으로부터 제안된 Gnielinski 상관식이 저 Re 영역에서부터 발생하는 난류화로 인한 열전달 성능 향상 효과를 고려하지 못 하였기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 그림에서 알 수 있듯이, 전반적으로 Gnielinski 상관식보다는 Wu-Little 상관식이 본 실험 결과를 잘 예측하였다. 하지만, Wu-Little 상관식도 Re 수 4000 이하 영역에서 실험 결과를 과소 예측하고, Re 수 8000 이상 영역에서는 실험 결과를 과대 예측하고 있는데, 이는 Wu-Little 상관식이 원형관과 다채널관에서 얻은 실험 결과로부터 제안된 식이기 때문에, 원형관에서만 이루어진 본 실험 결과를 명확하게 예측하지 못하는 것으로 보인다.

Fig. 7은 본 실험 조건에서 얻은 마찰 인자 f 와 평활 원형관 내 완전히 발달된 난류 유동에 적용 가능한 상관식으로 알려진 Blasius 식⁽³⁾으로 계산한 마찰 인자 $f_{Blasius}$ 를 비교하였다.

$$f_{Blasius} = 0.316Re^{-0.25}, \quad 3000 < Re < 100000 \quad (13)$$

그림에서 알 수 있듯이, 내경 5.35 mm, 6.54 mm 그리고 8.12 mm 관에서 얻은 f 는 Blasius 식으

로 구한 예측치와 최대 10 % 이내, 그리고 내경 3.36 mm 관에서는 최대 20 % 이내로 비교적 잘 예측하였다. 하지만, 관경의 세관화로 인해서 실험 결과와 Blasius 식의 예측치와의 오차가 증가되고 있는 경향이므로, Blasius 식을 세관에 적용 시에는 신중한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

본고에서는 운동량과 열전달의 유사성으로부터 차원해석⁽¹⁹⁾하여 얻은 Wu-Little 상관식을 기본 형태로 하고, 내경 5.35 mm와 3.36 mm 관에서 얻은 실험 결과를 최소 제곱 회귀법⁽²⁰⁾으로 수치 해석하여 최대 7 % 이내로 예측할 수 있는 새로운 상관식 (14)를 제안하였다. 그리고 Fig. 8에는 실험 결과와 새로 제안한 상관식으로 예측한 값을 나타내었으며, 실험 결과와 새로 제안한 상관식과의 오차는 식 (15)로 계산하였다.

$$Nu_{new} = \frac{0.034Re^{0.8}Pr^{0.3}}{200 < Re^{0.8}Pr^{0.3} < 10000} \quad (14)$$

$$e_m = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \frac{|Nu_{exp} - Nu_{cal}|}{Nu_{exp}} \right) \times 100 \quad (15)$$

그리고 관내 단상 유동에 있어서 열전달과 압력 강하는 서로 상충적인 관계를 가지며, 특히, 운동량 전달 및 열전달의 메카니즘이 같은 경우에는 Re 상사 관계로 나타내어진다. 이러한 Re 상사 관계로부터 열전달 및 압력 강하 결과를 Colburn j 계수와 식 (16)에서 구해지는 마찰 계수 f 로 관계지어 전열관의 전체 성능을 예측해 볼 수 있다.

$$j = St Pr^{2/3} \quad (16)$$

여기서, St 수는 식 (17)로 계산된다.

$$St = \frac{Nu}{Re Pr} \quad (17)$$

Fig. 9는 Re 수 변화에 따른 Colburn j 계수와 마찰 인자 f 의 비를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 관경의 세관화로 인해서 $StPr^{2/3}/f$ 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 내경 5.35 mm 및 3.36 mm 관의 열전달 성능은 8.12 mm 및 6.54 mm 관의 성능과 비교해 볼 때 동등 이

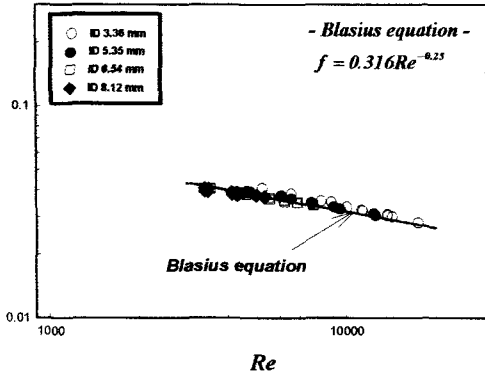


Fig. 7 Comparison of f_{exp} and f_{cal} using Blasius' correlation.

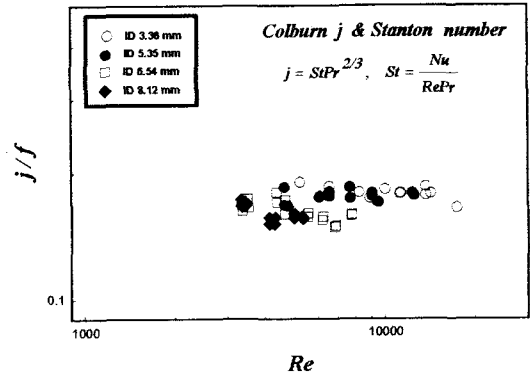


Fig. 9 Colburn j factor over friction factor f vs Reynolds number.

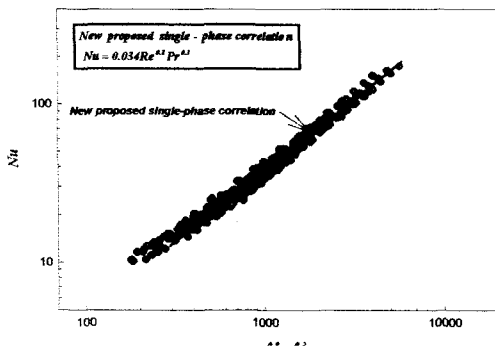


Fig. 8 Comparison of Nu_{exp} and Nu_{cal} using new proposed single-phase correlation.

상이라고 여겨진다.

4. 결론

세관(내경 3.36 mm, 5.35 mm, 6.54 mm, 8.12 mm)에서 R-718을 작동 유체로 하여, 액단상 열전달 및 압력 강하 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 내경 3.36 mm 관의 평균 열전달 계수가 내경 5.35, 6.54, 8.12 mm 관의 평균 열전달 계수보다 10 ~ 30 % 정도 높았다. 그리고 종래의 잘 알려진 열전달 상관식인 Gnielinski 상관식 및 세관에서 제안된 Wu-Little 상관식을 본 실험 결과와 비교·분석하여 새로운 액단상 열전달 상관식을 제안하였다.

(2) 종래 Blasius 식은 내경 5.35 mm, 6.54 mm, 8.12 mm 관에서 얻은 마찰 인자 f 를 최대 10 % 이내, 내경 3.36 mm 관에서는 최대 20 % 이내로 비교적 잘 예측하였다.

(3) 열전달과 압력강하의 비인 $StPr^{2/3}/f$ 값은 관경의 세관화로 인해서 증가하였으며, 내경 3.36 mm 및 5.35 mm 관의 성능은 6.54 mm 및 8.12 mm 관의 성능과 비교해 볼 때 동등 이상이라고 여겨진다.

참고문헌

- (1) 홍진우, 오후규, 1999, "세관내 대체냉매의 응축 열전달 특성," 공기조화·냉동공학회 학회지, Vol. 28, No. 5, pp. 396~402
- (2) Mishima, K. and Hibiki, 1996, "Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes", *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703~712.
- (3) Brasius, H. Z., 1908, *Math. Phys.*, English translation in National Advisory Committee for Aeronautics Technical Memo No. 1256.
- (4) Lockhart, R. W., and Martinelli, R. C., 1949, "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes", *Chem. Eng. Prog.*, 5, pp. 39~48.
- (5) Chisholm, D., 1967, "A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 10, pp. 1767~1778.

- (6) Peng, X.F., and Peterson, G.P., 1996, "Convective heat transfer and flow friction for water flow in micro-channel structures", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 12, pp. 2599~2608.
- (7) Tso, C.P. and Mahulikar, S.P., 1998, "The use of the Brinkman number for single phase forced convective heat transfer in micro-channels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 12, pp. 1759~1769
- (8) Adams, T.M., Abdel-Khalik, S.I., Jeter, S.M. and Qureshi, Z.H., 1998, "An experimental investigation of single-phase forced convection in micro-channels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 6, pp. 851~857.
- (9) Gnielinski, V., 1976, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *Int. Chem. Eng.* Vol. 16, pp. 359~368.
- (10) Kuzman, R., 1995, "Handbook of thermodynamic tables", Second Edited and Revised Edition, Begell House.
- (11) 노건상, 김종렬, 1999, "열·유체역학", 태훈출판사, pp. 190~196.
- (12) Dittus, F.W., and Boelter, L.M.K., 1930, University of California, Berkeley, Publications on Engineering, Vol. 2, pp. 443.
- (13) Sieder, E.N., and Tate, G.E., 1936, *Int. Eng. Chem.*, Vol. 28, pp. 1429
- (14) Petukhov, B.S., 1970, "Advanced in Heat Transfer", Vol. 6, Academic Press, New York.
- (15) Incropera, F.P., Kerby, J.S., Moffatt, D.F., and Ramadhyani, S., 1986, "Convection heat transfer from discrete heat sources in a rectangular channel", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 29(1986), pp. 1051~1058.
- (16) Peng, X. and Wang, B., 1994, "Experimental investigation on liquid forced-convection heat transfer through micro-channels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 73~82.
- (17) Wu, P.Y., Little, W.A., 1984, "Measurement of the heat transfer characteristics of gas flow in fine channels heat exchanger used for micro-miniature refrigerators", *Cryogenics* 24(8), pp. 415~420.
- (18) Filonenko, G.K., 1954, "Hydraulic resistance in pipe(in Russian)", *Teploenergetiks*, Vol. 1, No. 4, pp. 40~44.
- (19) Incropera, F.P. and Witt, D.P., 1990, "Fundamentals of heat and mass transfer", Wiley, Third edition, pp. 346~349.
- (20) 유해영, 이강섭 공역, 1994, "공학도를 위한 수치해석", 희중당, pp. 476~510.
- (21) 홍진우, 2001, "열펌프용 다중 세관식 열교환기의 성능에 관한 연구", 부경대 박사학위논문, pp. 44~55.