

## 세관 내 R-718의 단상 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구

오후규† · 박기원\* · 권옥배\*\* · 홍진우\*\*\* · 손창효\*\*\*\*

(원고접수일 : 2003년 11월 28일, 심사완료일 : 2004년 1월 5일)

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

Hoo-Kyu Oh† · Ki-Won Park\* · Ok-Bae Kwon\*\* · Jin-Woo Hong\*\*\* · Chang-Hyo Son\*\*\*\*

**Abstract** : Single-phase heat transfer coefficients and pressure drops of R-718 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 Blausius' correlation. Based on an analogy between heat and mass transfer, the new heat transfer correlation is proposed to predict the experimental data successfully.

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

## 1. 서 론

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.<sup>(1)</sup> 세관 내 액단상 열전달 및 압력 강하 특성에 관한 주요한 연구로는: Mishima-Hibiki<sup>(2)</sup>는 다양한 세관(8가지 종류, 수력직경 1~4 mm)에서 물/공기를 이용하여 종래의 압력강하에 관한 예측식과 비교 검토하였다. 실험결과로부터 단상류의 경

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail : ohkyu@pknu.ac.kr, T : 051)620-1501

\* 여수대학교 냉동공학과 (pkw@yosu.ac.kr)

\*\* 한국가스공사 연구개발원 (ref\_kwon@kogas.re.kr)

\*\*\* 삼성전자 DA총괄 시스템가전사업부 (jinwoo.hong@samsung.com)

\*\*\*\* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 (sonch@mail1.pknu.ac.kr)

우는 종래의 Blasius<sup>(3)</sup> 식과 잘 일치하였으나, 이상 유동의 경우는 Lockhart -Martinelli<sup>(4)</sup> 변수와 마찰 손실 배수  $\Phi^2$ 의 관계를 기본으로 하는 종래의 압력강하 상관식과 유사하다는 가정하에, 종래의 Chisholm<sup>(5)</sup>의 상관식을 이용한 예측식을 제안하였다. Peng-Peterson<sup>(6)</sup>은 물을 이용하여 수력 직경 0.133 ~ 0.367 mm 인 장방형 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 내에서는  $Re$  수가 증가함에 따라  $Nu$  수가 감소하는 특이한 열전달 특성을 보고하였다. 그리고 유로 형상의 영향을 고려한 여러 가지 새로운 인자( $D_h/Wc$ ,  $H/W$ ,  $Z$ )를 도입하여 그의 실험 범위 내에서만 적용할 수 있는 단상 열전달 상관식을 제안하였다. 또한, Tso-Mahulikar<sup>(7)</sup>은 종래의 Peng-Peterson<sup>(6)</sup>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 장방형 세관에 적용할 수 있는 액단상 열전달 상관식을 제안하였다. 한편, Adams 등<sup>(8)</sup>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<sup>(9)</sup> 상관식으로 예측한 값보다 높게 나옴을 보고하였다. 그리고 Gnielinski 상관식을 수정하여 세관에 적용할 수 있는 액단상 열전달 상관식을 제안하였다. 본 고에서는 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.

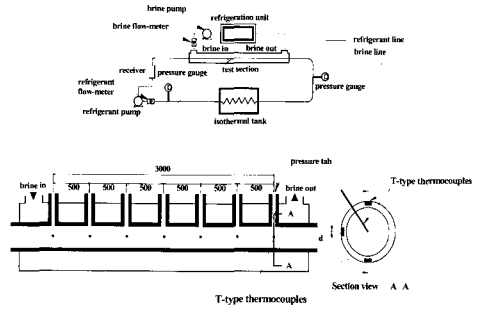


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus and detail of test section for single-phase(liquid) heat transfer and pressure drop.

## 2. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치는 냉매(R-718, hot water)가 순환되는 경로와 브라인(cool water)이 순환되는 경로로 구성하였다. 냉매는 자기 펌프, 질량 유량계 및 항온조에서 일정한 유량과 온도로 조절되어 시험부로 유입된다. 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. 외관에는 브라인이 흐르고, 내관에는 냉매가 흐른다. 그리고 시험부 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 wire 형 T형 열전대를 사용하여, 냉매 내부와 내관 외벽면 상·측·하부 온도를 측정할 수 있도록 내관 내부 및 내관 외벽에 부착했다. 그리고 열전대에서 측정된 데이터는 데이터 로그의 단자에 연결되어 바로 PC에서 처리하도록 하였다. 시험부 입·출구 및 각 소구간 내 입·출구에서 차압을 측정할 수 있도록 차압 변환기를 설치하였으며 모든 측정은 냉매의 온도, 압

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

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| Refrigerant                    | R-718(water)           |
| Temperature of refrigerant(°C) | 50                     |
| Temperature of brine(°C)       | 10                     |
| ID of inner tube (mm)          | 3.36, 5.35, 6.54, 8.12 |
| Reynolds number of refrigerant | 1000 ~ 20000           |
| Mass flow rate of brine(kg/h)  | 450                    |

력 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"<sup>(10)</sup>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  $q_r$  [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]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  $h_{r,L}$  [ $\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]은 식 (3)으로 계산한다.

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

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

여기서,  $M_r$ 은 냉매(온수)의 질량 유량 [ $\text{kg}/\text{s}$ ],  $T_{r,in}$ 과  $T_{r,out}$ 는 냉매의 입구와 출구 온도 [K],  $c_{p,r}$ 은 냉매의 비열 [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ] 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.

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

여기서,  $T_{wo}$ 는 실험에서 측정된 내관 외벽면 상, 측, 하부의 표면 온도를 평균한 온도 [K]이고,  $d_{OD}$ 와  $d_{IN}$ 는 내관의 외경 [m]과 내경 [m]이다. 또  $k_w$ 는 동관의 열전도율 [ $\text{kW}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]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 [ $\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]이며  $n$ 은 소구간의 수이다. 그리고 실험을 통해서 얻은 냉매의 체적 유량  $V_r$  [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]과 내관 단면적으로부터, 냉매의 평균 유속  $u_r$  [m/s]을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

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

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

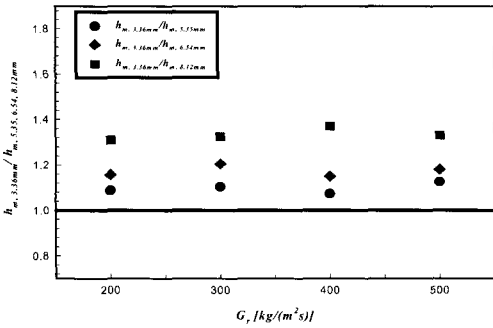


Fig. 2 Comparison of mean heat transfer coefficients.

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

여기서,  $dP_r$ 은 소구간내 마찰 압력 손실 [Pa] 이고  $f$ 는 마찰 인자(friction factor)이며  $\rho_r$ 은 냉매의 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] 이다. 그리고 Kline & McClintock의 방법<sup>(12)</sup>에 따라 본 실험에 대한 실험 오차 해석을 수행했는데 열전달 계수의 최대 오차가  $\pm 9.9\%$ , 마찰 압력강하의 최대 오차는  $\pm 5.4\%$  이었다.

### 3.2 세관 내 단상 열전달 및 압력강하

단상 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, 횡축은 냉매의 질량 유속  $G_r$ 을 나타내고, 종축은 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 향상이 두드러졌다. 이는 관경의 세관화로 인한 열전달 성능 향상 효과 때문인 것으로 보여지는데, 이런 관경의 세관화가 성능향상에 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<sup>(13)</sup>, Sieder-Tate<sup>(14)</sup>, Petukov-Popov<sup>(15)</sup>와 Gnielinski<sup>(9)</sup> 등이 있다. 그리고 최근 들어, 세관에서 제안된 상관식으로는 Peng-Peterson<sup>(6)</sup>, Incropera<sup>(16)</sup>, Peng-Wang<sup>(17)</sup>, 그리고 Wu-Little<sup>(18)</sup> 등이 있다. 이중에서, Gnielinski 상관식과 Wu-Little의 상관식과 본 실험 결과를 비교·검토하였다. 먼저, Gnielinski 상관식은 종래 평활 원형관 내 난류 영역에서 폭넓게 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<sup>(19)</sup>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.

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

Fig. 3과 4는 각각 내경 8.12 mm와 6.54 mm 관에서 얻은 평균 열전달 계수  $h_m$ 과 Gnielinski 상관식으로 구한 예측치를 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 < 8000에서 실험 결과를 잘 예측하고 있지만, Re 수 2000 ~ 4000에서는 실험 결과보다 과소 예측하고 있었다. 그리고 Fig. 5와 6은 각각 내경 5.35 mm 와 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 mm 와 3.36 mm 관경 적용하기는 매우 힘들 것으로 판단되며, 저 Re 수 영역(2000 < Re < 4000)의 세관 내 열전달 특성을 예측하지 못하는 것으로 보인다. 이는 종래 대구 경관 내 열전달 실험으로

으로부터 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 못 하는 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<sup>(3)</sup>으로 계산한 마찰 인자  $f_{Blasius}$ 를 비교하였다.

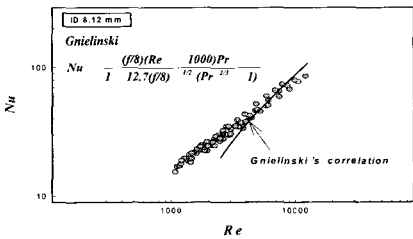


Fig. 3 Comparison of  $Nu_{exp}$  and  $Nu_{cal}$  using Gnielinski's correlation in ID 8.12 mm tube.

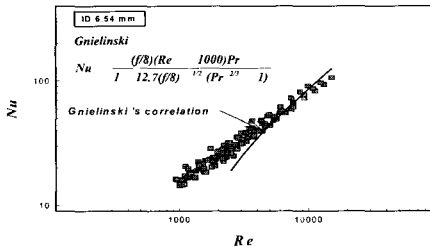


Fig. 4 Comparison of  $Nu_{exp}$  and  $Nu_{cal}$  using Gnielinski's correlation in ID 6.54 mm tube.

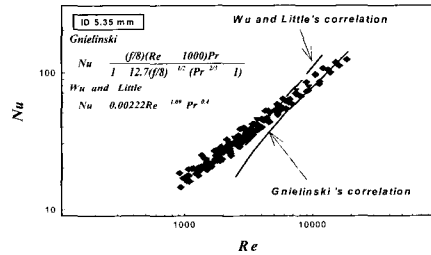


Fig. 5 Comparison of  $Nu_{exp}$  and  $Nu_{cal}$  using Gnielinski's and Wu-Little's correlation in ID 5.35 mm tube.

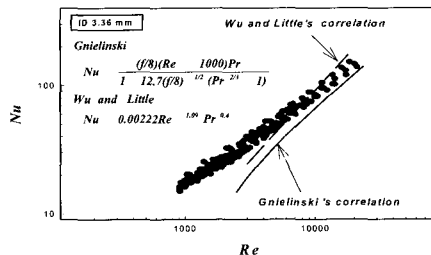


Fig. 6 Comparison of  $Nu_{exp}$  and  $Nu_{cal}$  using Gnielinski's and Wu-Little's correlation in ID 3.36 mm tube.

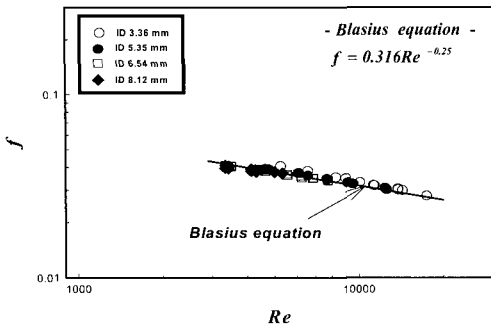


Fig. 7 Comparison of  $f_{exp}$  and  $f_{cal}$  using Blasius' correlation.

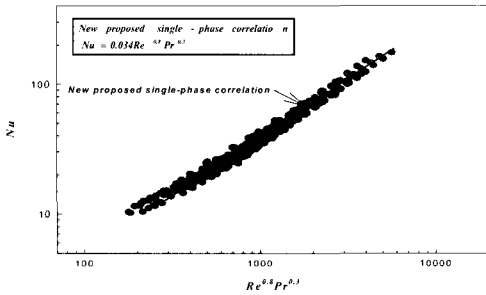


Fig. 8 Comparison of  $Nu_{exp}$  and  $Nu_{cal}$  using new proposed single-phase correlation.

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

그림에서 알 수 있듯이, 내경 5.35 mm, 6.54 mm 그리고 8.12 mm 관에서 얻은  $f$ 는 Blasius 식으로 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 상사성으로부터 차원해석<sup>(20)</sup>하여 얻은 Wu-Little 상관식을 기본 형태로 하고, 내경 5.35 mm 와 3.36 mm 관에서 얻은 실험 결과를 최소 제곱 회귀법<sup>(21)</sup>으로 정리하여 최대 7 % 이내로 예측할 수 있는 새로운 상관식 (14)를 제안하였다. 그리고 Fig. 8 에는 실험 결과와 새로 제안한 상관식으로 예측한 값을 나타내었으며, 실험 결과와 새로 제안한 상

관식과의 오차는 식 (15)로 계산하였다.

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

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

그리고 관내 단상 유동에 있어서 열전달과 압력강하는 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 비율 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 관경의 세관화로 인해서  $St Pr^{2/3}/f$  값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 내경 5.35 mm 및 3.36 mm 관의 열전달 성능은 8.12 mm 및 6.54 mm 관의 성능과 비교해 볼 때 동등 이상이라고 여겨진다.

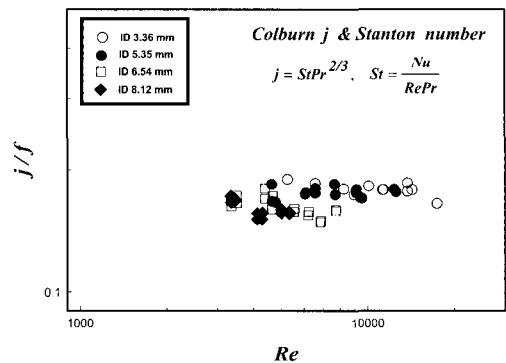


Fig. 9 Colburn  $j$  factor over friction factor  $f$  vs Reynolds number.

#### 4. 결 론

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] 오후규, 홍진우, "세관내 대체냉매의 응축 열전달 특성," 공기조화·냉동공학회 학회지, Vol. 28, No. 5, pp. 396~402, 1999.
- [2] K. Mishima, and Hibiki, "Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes", *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703~712, 1996.
- [3] H. Z., Brasius, *Math. Phys.*, English translation in National Advisory Committee for Aeronautics Technical Memo No. 1256, 1908.
- [4] R. W., Lockhart, and R. C., Martinelli, "Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes", *Chem. Eng. Prog.*, 5, pp. 39~48, 1949.
- [5] D., Chisholm, "A theoretical basis for the Lockhart-Martimelli correlation for two-phase flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 10, pp. 1767~1778, 1967.
- [6] X. F., Peng and G. P., Peterson, "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, 1996.
- [7] C. P., Tso and S. P., Mahulikar, "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, 1998.
- [8] T. M., Adams, S. I., Abdel-Khalik, S. M., Jeter and Z. H., Qureshi, "An experimental investigation of single-phase forced convection in micro-channels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 6, pp. 851~857, 1998.
- [9] V., Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *Int. Chem. Eng.* Vol. 16, pp. 359~368, 1976.
- [10] R., Kuzman, "Handbook of thermodynamic tables", Second Edited and Revised Edition, Begell House, 1995.
- [11] 노건상, 김종렬, "열·유체역학", 태훈출판사, pp. 190~196, 1996.
- [12] S. J., Kline and F. A., McClintock, "The description of uncertainties in single sample experiments", *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp. 8~9, 1953.
- [13] F. W., Dittus and L. M. K., Boelter,

University of California, Berkeley, Publications on Engineering, Vol. 2, pp. 443, 1930.

[14] E. N., Sieder and G. E., Tate, *Int. Eng. Chem.*, Vol. 28, pp. 1429, 1936.

[15] B. S., Petukhov, "Advanced in Heat Transfer", Vol. 6, Academic Press, New York, 1970.

[16] F. P., Incropera, J. S., Kerby, D. F., Moffatt and S., Ramadhyani, "Convection heat transfer from discrete heat sources in a rectangular channel", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 29(1986), pp. 1051~1058, 1986.

[17] X., Peng and B., Wang, "Experimental investigation on liquid forced-convection heat transfer through micro-channels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 73~82, 1994.

[18] P. Y., Wu and W. A., Little, "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, 1984.

[19] G. K., Filonenko, "Hydraulic resistance in pipe(in Russian)", *Teploenergetiks*, Vol. 1, No. 4, pp. 40~44, 1954.

[20] F. P., Incropera and D. P., Witt, "Fundamentals of heat and mass transfer", Wiley, Third edition, pp. 346~349, 1990.

[21] 유해영, 이강섭 공역, "공학도를 위한 수치해석", 회중당, pp. 476~510, 1994.

[22] 홍진우, "열펌프용 다중 세관식 열교환기의 성능에 관한 연구", 부경대 박사학위논문, pp. 44~55, 2001.

### 기호 설명

- A : 전열 면적[m<sup>2</sup>]
- c<sub>p</sub> : 비열[kJ/kg · K]
- d : 관내경[m]
- dz : 소구간 길이[m]
- G : 질량 유속[kg/m<sup>2</sup> · s]
- h : 열전달 계수[kW/m<sup>2</sup> · K]
- κ : 열전도도[kW/(m · K)]
- L : 시험부 길이[m]
- n : 소구관 번호[ / ]
- p : 압력[kg/cm<sup>2</sup>]
- q : 열유속[kW/m<sup>2</sup>]
- Q : 전열량[kW]
- μ : 점도[Pa · s]
- ρ : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

### 하 첨 자

- c : 냉각수
- cal : 계산값
- exp : 실험값
- ID : 내경
- in : 입구
- L : 국소
- l : 액체
- m : 평균
- OD : 외경
- out : 출구
- r : 냉매
- w : 관벽
- wi : 관 내벽
- wo : 관 외벽



## 저 자 소 개



### 오후규 (吳厚圭)

1948년생, 학력 : 1975년 국립부산수산대학교 식품공학과 졸업(공학학사), 1977년 동대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 1983년 와세다 대학교 졸업(공학박사), 현재 국립부경대학교 기계공학부 교수 재직중



### 박기원 (朴基元)

1960년생, 학력 : 1983년 국립부산수산대학교 냉동공학과 졸업(공학학사), 1985년 동대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 1993년 동대학원 냉동공학과 졸업(공학박사), 현재 국립여수대학교 냉동공학과 교수 재직중.



### 권옥배 (權沃培)

1961년생, 학력 : 1991년 국립부산수산대학교 냉동공학과 졸업(공학학사), 1993년 동대학원 냉동공학과 졸업(공학석사), 1997년 동대학원 냉동공학과 졸업(공학박사), 현재 한국가스공사 연구개발원 이용기기 연구센터 재직중.



### 홍진우 (洪鎭佑)

1972년생, 학력 : 1995년 국립부산수산대학교 냉동공학과 졸업(공학학사), 1998년 국립부경대학교 산업대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 2001년 국립부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학박사), 현재 삼성전자 DA총괄 시스템가전사업부 재직중.



### 손창효 (孫昌孝)

1972년생, 학력 : 1998년 국립여수수산대학교 냉동공학과 졸업(공학학사), 2000년 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 졸업(공학석사), 현재 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 박사과정 중.