

세관 내 R-22의 증발 전열 특성에 관한 연구

장 승 환*, 최 영 석**, 홍 진 우*, 권 옥 배***, 구 학 근****, 오 후 규*****

Evaporating heat transfer characteristics of R-22 in small diameter tubes

Seung-Hwan Jang*, Y. S. Choi**, Jin-Woo Hong*, Ok-Bae Kwon*, H. G. Ku*, Hoo-Kyu Oh**

Abstract : Evaporating heat transfer coefficients of R-22 were measured inside smooth, horizontal copper tubes with inner diameters of 3.36 mm, and 5.35 mm, respectively. The experiments were conducted in the closed loop, which was driven by a magnetic gear pump. Experiments were performed for the following range of variables: mass velocity of refrigerants (200 to 400 kg/m² · s), saturation temperatures (0 °C, 5 °C) and quality (0 to 1.0).

The main results obtained are as follows : Evaporating heat transfer coefficients in the small diameter tubes (ID < 7 mm) were observed to be strongly affected by a variety of diameters and to differ from those in the large diameter tubes. The heat transfer coefficients of the small diameter tubes are higher than those of the large diameter tubes. Comparing the heat transfer coefficients between experimental results and some well-known previous predictions (Shah's correlation, Gungor-Winterton's and Kandlikar's correlation), it was very difficult to apply those to small diameter tubes.

Key word : Evaporating heat transfer coefficient(증발 열전달 계수), Small diameter tube(세관),

기 호 설 명

c_p	: 비열[kJ/(kg · K)]	q_{CON}	: 열유속[kW/(m ² K)]
d	: 관내경[m]	Q_{CON}	: 전열량[kW]
G	: 질량유속[kg/(m ² · s)]	T	: 온도[K]
h	: 열전달 계수[kW/(m ² · s)]	x	: 건도[/]
i_{fx}	: 응축잠열[kJ/kg]	Δz	: 소구간 길이[m]
κ	: 열전도도[kW/(m · K)]	L	: 시험부 길이[m]

하첨자

* 부경대학교 대학원
 ** LG 전자
 *** 한국 가스 공사
 **** 동명대학 가스 냉동과
 ***** 정회원, 부경대학교 냉동공조공학과

cal : 계산값
 exp : 실험값
 ID : 내경
 m : 평균

OD : 외경
 R : 냉매
 sat : 포화상태
 w : 관벽
 t, s, b : 상부, 측부, 하부
 in : 입구
 L : 국소
 l : 액체

무차원수

Bo : Boiling number $\left[\frac{q}{G \cdot i_{fg}} \right]$

Co : Convection number
 $\left[\left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \right]$

1. 서론

최근 고성능 냉동공조용 열교환기 개발과 관련된 기술의 하나로 작은 수력직경을 가진 세관(수력직경 7 mm 미만)을 이용한 설계방식이 제안되어지고 있다. 하지만 지금까지의 세관에 관련된 연구는 그 실용화에 있어서 미흡한 실정이다. 본고에서는 3.36 mm, 5.35 mm 내경을 가지는 수평 평활동관 증발전열실험을 실시하여 세관 증발전열 특성에 대해 분석하고 세관 열교환기 기초 설계 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 세관내 증발 실험 장치도 및 시험부 상세도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험장치는 강제 순환식 사이클이며, 냉매가 순환되는 경로와 브라인이 순환되는 경로로 구성되어 있다. 냉매는 자기펌프 변속기 및 질량 유량계를 통해서 일정한 유량으로 조절되어 예열기를 거쳐 시험부로 유입된다. 시험부에서 나온 냉매 증기는 응축기에서 일정 온도와 유량으로 조절되어진 브라인으로 응축되어 수액기로 유입된다. 또한 시험부에 균일 열유속을 가할 수 있도록 동관 외벽에 가열 코일을 감았다. 관길이 방향으로 125 mm씩 동일간격으로

소구간을 나누고, 각 구간에는 표준 온도계로 보정된 T형 열전대를 사용하여 냉매, 시험부 동관 외관벽 상·측·하부의 온도를 각각 측정할 수 있도록 하였다. 그리고 관길이 방향으로 250 mm 동일간격으로 압력탭을 설치하고 차압계를 이용하여 차압을 측정하였으며 전체 실험 장치는 열침입 및 열손실을 최소화할 수 있도록 단열 되었다. Table 1은 실험 조건을 정리한 것이다.

Table. 1 Experimental conditions

Refrigerant	R-22
Test section	Horizontal copper tube
I.D. of test section (mm)	3.36, 5.35
Mass velocity (kg/m's)	200 ~ 400
Quality(/)	0.0 ~ 1.0
Heat flux(kW/m ²)	20 ~ 30

3. 실험결과 및 고찰

3.1 데이터 처리

본 연구에서 사용한 R-22와 그 대체 냉매인 R-134a의 열물성값 계산은 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 냉매 물성 계산 프로그램인 'REFPROP (version 5.0)⁽¹⁾를 이용하였다. 그리고 증발 열전달 특성을 파악하기 위한 실험 데이터의 분석에는 다음과 같은 계산식을 사용하였다. 시험부에 전달되는 열유속은 식(1)로 계산했다.

$$q_{CON} = \frac{Q_{CON}}{\pi \cdot d_{IN} \cdot dz} \quad (1)$$

여기서, Q_{CON} 은 동관 외벽을 통해서 공급된 전열량이다. 그리고 증발 평균 국소 열전달계수는 식(2)를 통해 구할 수 있다.

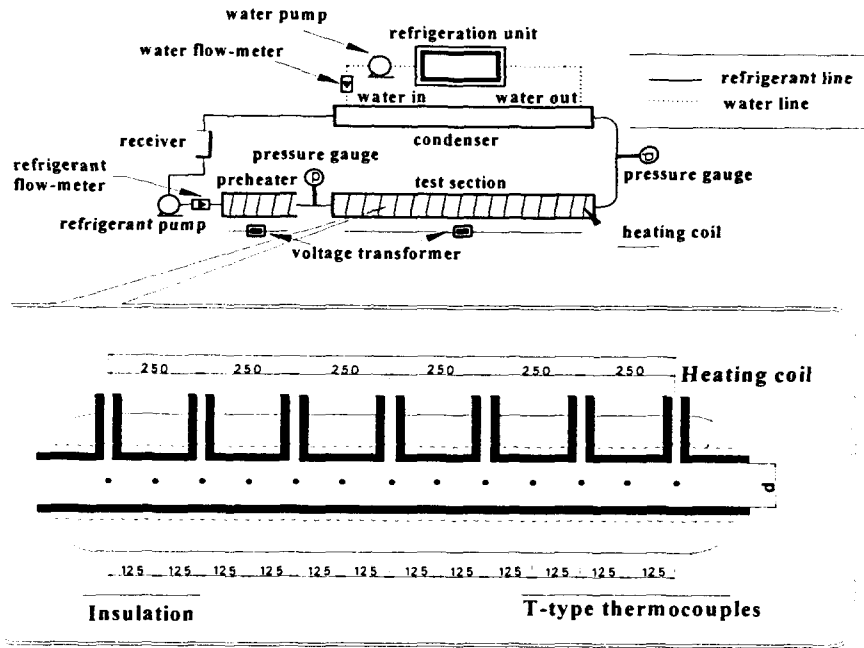


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus and details of test section

$$h_L = \frac{q_{CON}}{(T_{Wm} - T_{sat})} \quad (2)$$

여기서, T_{Wm} 은 시험부 동관 내벽면의 평균 국소 온도로 식(3), (4)로 계산되어진다. T_{sat} 는 냉매의 포화 온도로 직접 시험부 내부에서 측정된 온도이다.

$$T_{WT/WS/WB} = T_{WT/WS/WB} - Q_{CON} \cdot \frac{\ln(d_{OD} / d_{ID})}{(2 \cdot \pi \cdot \Delta z \cdot \kappa_w)} \quad (3)$$

$$T_{Wm} = \frac{(T_{WT} + 2 \cdot T_{WS} + T_{WB})}{4} \quad (4)$$

여기서, T_{WT} , T_{WS} , T_{WB} 는 각 소구관에서 실제 측정한 시험부 동관 외벽면 상·측·하부 온도이고, $T_{WT/WS/WB}$ 는, 열전달이 정상 상태이고 일차원 열전도 방정식이 성립한다고 가정하여 측정한, 각 소구간의 내 벽면 국소 상·측·하부 온도이다. 또, d_{ID} 는 동관의 내경, d_{OD} 는 동관의 외경, κ_w 는 동관의 열전도도이다. 그리고 각 소구간에서의 건도는 식(5)로 계산했다.

$$x = x_{IN} + \frac{\pi \cdot d_{in}}{G_R \cdot i_{fg}} \int_{z_1}^{z_2} q_{CON} dz \quad (5)$$

여기서, G_R 는 냉매 질량 유속이고 i_{fg} 는 냉매 증발 잠열이다.

3.2 관내측 증발 전열 특성

Fig. 2는 냉매 R-22의, 내경 3.36 mm관과 5.3 mm 관에서 각각 측정한 평균 국소 열전달 계수를 건도에 따라 비교한 그래프이다. 열전달 계수가 내경 3.36 mm관 일 때, 5.35 mm관 보다 5-15 % 정도 높게 나타나고 있다. 또한, 포화온도가 0 °C 인 경우가 5 °C 인 경우보다 열전달 계수가 높게 나타났다. 이것은 증발 온도 하강으로 인한 냉매의 비체적과 유동 양식 등의 변화에 의한 것으로 여겨진다. Fig. 3은 동일한 열유속에서 질량유속변화에 따른 내경 3.36 mm 관의 평균 국소 열전달 계수 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험영역에서 질량 유속 증가로 인한 성능 향상의 경향이 세관에도 적용된다. Fig 2에서 관경 축소에 따른 열전달계수의 증가

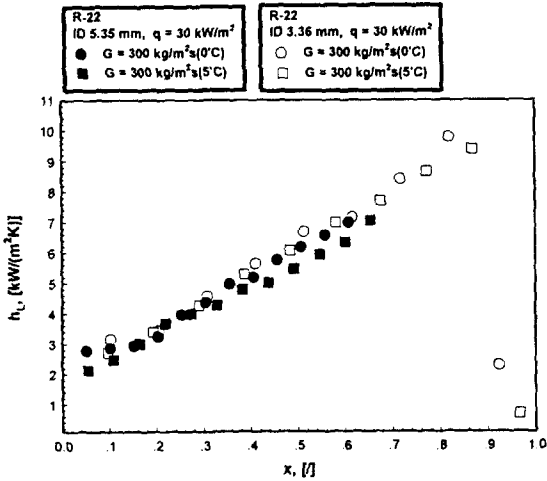


Fig. 2 Comparison of mean local evaporation heat transfer coefficients with mass velocity ID 3.36mm, 5.35mm

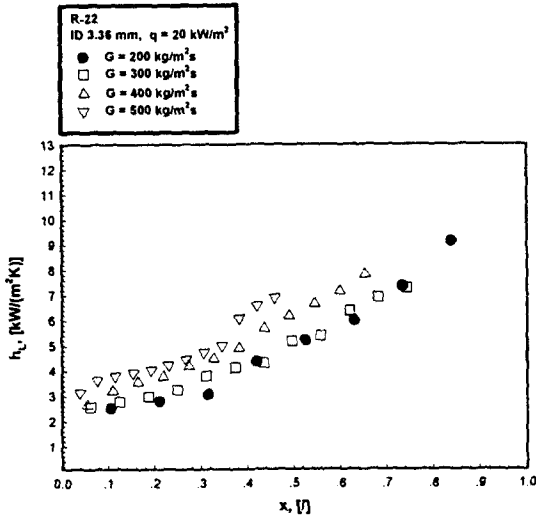


Fig. 3 Comparison of mean local evaporation heat transfer coefficients with mass velocity in 3.36 mm

는 환상류 영역의 확대, 유효 전열 면적의 증가 등에서 원인을 찾을 수 있을 것으로 여겨진다⁽³⁻⁵⁾. 따라서, 냉매 증발 시 관경 축소로 인한 성능 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 세관화로 인한 전열 성능 향상의 결과는 응축에서도 동일한 경향이 발생되는 것으로 보고되고 있다^(6, 7).

3.3 종래 상관식 비교

대구경 수평 평활관에서 적용할 수 있는 여러가지 증발 열전달 상관식이 있는데 이들 중에서 널리 사용되고 있는 Shah⁽⁹⁾, Gungor-Winterton⁽¹⁰⁾ 그리고 Kandlikar⁽¹¹⁾의 상관식과 본 실험 결과를 비교했다. Shah의 상관식은 종래의 상관식을 바탕으로 발전시켜 수평·수직관에 대한 것이다. Fig. 4는 Shah 상관식으로 예측한 값과 본 실험 결과에서 얻은 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 종축의 e 는 실험값과 예측값사이의 오차를 식 (6)과 같이 계산하여 나타낸 것이다.

$$e = \frac{|h_{exp} - h_{cal}|}{h_{exp}} \times 100 \quad (6)$$

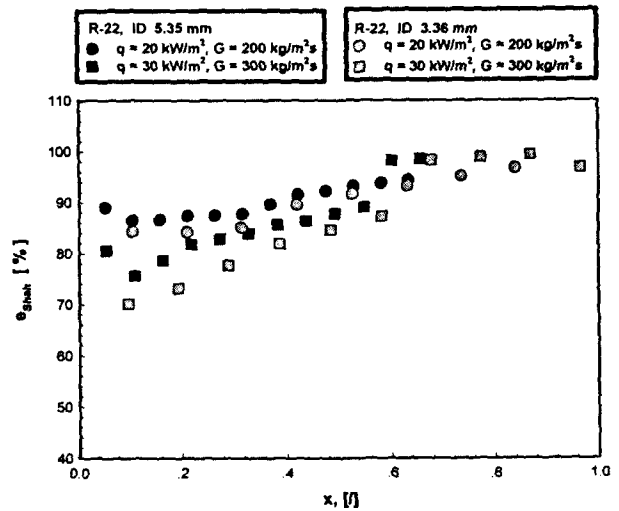


Fig. 4 Comparison between experimental h_{exp} and calculated h_{Shah} using Shah's correlation.

그림에서 Shah 상관식과 실험결과와 65% ~ 95% 정도의 큰 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 R-11, R-12, R-22, R-113, R-114, 에틸 알콜 등 많은 데이터로부터 얻은 결과를 정리하여 제안한 Gungor-Winterton 상관식과 실험 결과와의 오차를 나타낸 것이고, Fig. 6은 수직·수평관에서의 유체 비등에 대한 일반적인 상관식으로 제안한 Kandlikar의 상관식과 실험 결과와의 오차를 나타낸 것이다. 세관 증발 실험 결과가 종래의 대구경관에서 얻은 상관식과 큰 오

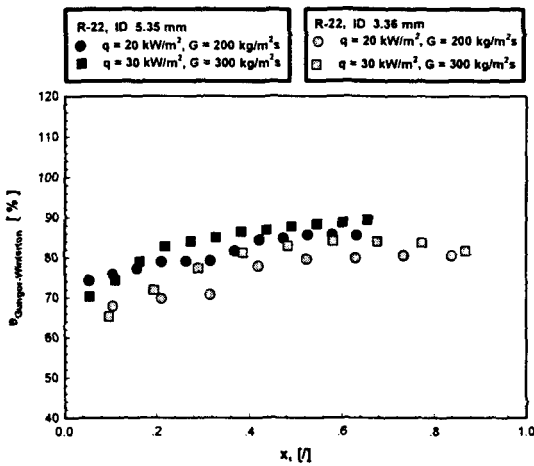


Fig. 5 Comparison between experimental h_{exp} and calculated h_{G-W} using Gungor-Winterton's correlation.

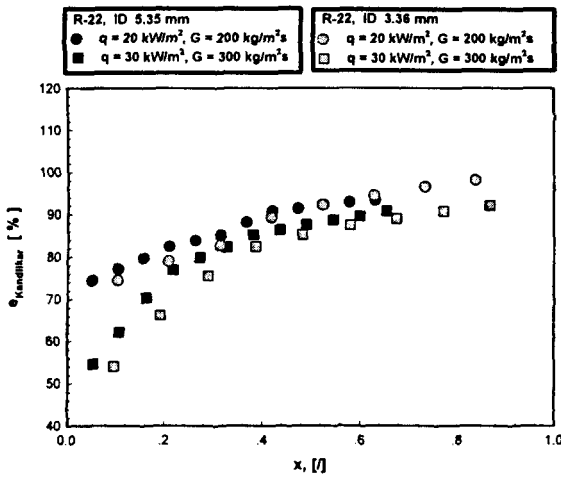


Fig. 6 Comparison between experimental h_{exp} and calculated h_{Kand} using Kandlikar's correlation.

차를 나타내는 이유는 각 상관식에서 사용되고 있는 Convection number(Co), Boiling number(Bo), Dittus-Boelter의 액체 대류 열전달 상관식으로 계산되는 h_l 등의 인자들의 상관관계가 세관 증발 전열 특성과는 다르기 때문이라고 여겨진다. 따라서, 세관에 종래의 증발 상관식을 적용하는 것은 신중한 검토가 필요할 것으로 보이며 세관에 적용 가능한 새로운 상관식 개발이 요망된다.

4. 결론

세관(3.36 mm, 5.35 mm)에서 R-22를 작동 유체로 하여 실시한 증발 전열 특성 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험 범위에서 내경 5.35, 3.36 mm판의 비교 실험한 결과, 관경이 작은 내경 3.36 mm판의 증발 열전달 계수가 5 ~ 15 % 정도 높았다.

(2) 관내 증발 열전달 예측식으로 잘 알려진 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar의 상관식을 세관에 적용하는 것은 오차가 클 것으로 여겨지며, 세관에 적용할 수 있는 상관식 개발을 위해서 보다 많은 실험 데이터가 필요하다.

후 기

본 연구는 에너지 관리 공단 부설 에너지 자문 기술 개발 센터와 (주)한서 엔지니어링의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) NIST Standard Reference Database 23, 1996, "REFPROP Version 5.0"
- (2) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "The description of uncertainties in single sample experiments", *Mechanical Eng.*, Vol.75, pp 8~9.
- (3) Fujita, H., Ohara, T., Hirota, M. and Furuta, H. 1995, "Gas-liquid flows in flat channels with small channel clearance", *Proceedings of The 2nd International Conference on Multiphase Flow '95-Kyoto*, IA3-37 ~ 44.
- (4) 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.
- (5) Wilmarth, T. and Ishii, M., 1994, "Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1749 ~ 1758.
- (6) 홍진우, 이호림, 김기수, 노건상, 오후규,

1999, 소구경관내 R-22와 R-134a의 응축 전열 특성에 관한 연구, 대한기계학회 열공학부문, '99 추계 학술 대회 논문집, pp 685~690.

(7) 오종택, 飛原 英治, 2000, "HFC 순수냉매 및 3성분 혼합냉매의 수평관내 응축열전달", 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제2호, pp 233~240.

(8) 오후규, 노건상, 김성규, 1993, "대체냉매 R-134a의 수평관내 증발 열전달에 관한 연구", 냉동·공조공학회지, Vol. 12, No.4, pp. 235~246.

(9) Shah, M.M., 1982, "Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer Equations and Further Study", ASHRAE Transactions, Vol. 88, pp. 185 ~ 196.

(10) Gungor, K.E. and Winterton, R.H.S., 1986,

"A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29, pp. 351 ~ 358

(11) Kandlikar, S.G., 1987, "A General Correlation for Saturated Two - Phase Flow Boiling Heat Transfer inside Horizontal and Vertical Tubes", ASME Winter Annual Meeting, pp. 14 ~ 18.

(12) Dittus, F.W. and Boelter, L.M., 1930, "Pubric Engineering", Vol. 2, University of California at Berkeley, p. 443.

(13) Froster, H.K. and Zuber, N., 1955, "Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer", AIChE Journal, Vol. 1, pp. 531 ~ 535.