

암모니아의 수평관내 단상 및 응축 열전달계수의 측정

백 영 진, 장 영 수, 김 영 일[†]

한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

Measurement of Single Phase and Condensation Heat Transfer Coefficients of Ammonia in a Horizontal Tube

Young-Jin Baik, Young-Soo Chang, Youngil Kim

Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

(Received February 1, 2000; revision received April 10, 2000)

ABSTRACT: Single phase and condensation heat transfer characteristics of ammonia in a horizontal tube have been investigated experimentally. The horizontal test section is composed of smooth SUS316 tube for refrigerant flow, surrounding annulus for water flow, and temperature and pressure measuring sensors. For single phase test, subcooled ammonia mass flux was varied from 320 to 501 kg/m²s and temperature was varied from 18 to 47°C. For condensation test, mass flux and saturation temperature were varied from 86 to 128 kg/m²s and 34 to 47°C, respectively. The equations of Gnielinski, Soliman *et al.*, Traviss *et al.*, Cavallini and Zecchin, Shah, Chen *et al.*, Tandon *et al.*, and Chitti and Anand were compared with the experimental data. New correlations are proposed based on the experimental results and the absolute mean deviation of the experimental data becomes 1.0% for single phase test and 4.9% for condensation test.

Key words: Ammonia(암모니아), Condensation(응축), Heat transfer coefficient(열전달계수), Horizontal tube(수평관), Correlation(상관식)

기 호 설 명

A : 시험관의 면적 [m²]
 c_p : 비열 [J/kg·K]
 D : 직경 [m]
 D_h : 수력 직경 [m]
 G : 냉매의 질량유속 [kg/m²·s]
 h : 열전달계수 [W/m²·K]
 HTC : 열전달계수 [W/m²·K]
 j_g^* : 무차원 가스속도

k : 열전도율 [W/m·K]
 $LMTD$: 냉매와 물의 대수평균온도차 [K]
 Nu : Nusselt 수, hD/k
 Pr : Prandtl 수, $c_p\mu/k$
 Q_w : 전열량 [W]
 Re : Reynolds 수, $\rho VD/\mu$
 R_w : 관의 열저항 [K/W]
 U : 총열전달계수 [W/m²·K]
 V : 유체의 평균속도 [m/s]
 x : 시험관의 두께 [m]; 건도

그리스 문자

α : 변형된 공극률

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5675; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: yikim@kist.re.kr

μ : 점성계수 [Pa · s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

i : 시험관의 내벽면, 내관
 l : 포화액
 m : 평균
 n : 월슨 플롯에서의 실험 횟수
 o : 시험관의 외벽면, 환상공간
 v : 포화증기
 w : 벽면

1. 서 론

우수한 열역학 및 열전달 특성 때문에 CFC계 냉매가 개발되기 전까지 냉매로서 가장 많이 사용되었던 암모니아는 대용량의 저온 산업용으로 많이 사용되었으나 자극성, 독성 및 가연성으로 인하여 공조용으로는 널리 사용되지 못한 것이 사실이다. 그러나 최근 CFC계 냉매에 의한 오존층 파괴와 하절기의 냉방용 전력 소비율 급증 등에 대한 대안으로 천연 가스를 이용한 흡수식 냉난방기기의 개발 및 보급에 대한 사회적 요구가 높아지고 있다. 흡수식 냉온수기를 소형 공랭화하여 사용하거나 더욱 효율이 높은 사이클을 개발하려는 등 많은 분야에서 새로운 연구가 활성화되면서 암모니아-물을 작동 유체로 하는 흡수식 열펌프에 대한 관심이 높아지고 있다. 암모니아를 사용하는 시스템을 설계하기 위해서는 암모니아 및 암모니아-물 혼합물의 열전달계수 상관식이 반드시 요구된다.

이와 관련하여 시스템 설계를 위한 냉매들의 관내 응축 현상은 오래 전부터 많은 연구가 진행되어왔다. Ananiev *et al.*⁽¹⁾은 단상 열전달계수와 액상과 기상의 밀도, 그리고 건도만의 간단한 함수로 관내 대류 열전달 상관식을 제시한 바 있고, Soliman *et al.*⁽²⁾은 마찰력, 운동량, 중력이 벽면에서 전단응력에 미치는 영향을 환상류의 모델링을 통하여 수식화하였으며, 물, R113, 에탄올, 메탄올 등의 실험 자료를 이용하여 상관식을 제시하였다. Traviss *et al.*⁽³⁾은 von Karman의 속도분포를 가정한 환상 유동 모델에 운동량과 열전달의 상사성을 적용하고 차원해석과 무차원 변

수를 도입하여 국소 열전달계수에 관한 상관식을 유도하고 R12와 R22의 실험결과와 비교하였으며, Cavallini and Zecchin⁽⁴⁾은 반경험식에 의한 상관식이 환상유동의 간단한 유체 역학적 모델링과 운동량과 열전달의 상사성으로부터 강제대류 열전달을 잘 묘사하고 있음을 보이고 R11, R12, R21, R22, R113, R114를 포함한 몇 가지의 냉매를 사용하여 자신이 제시한 무차원 변수가 적절하다는 것을 보였다. Shah⁽⁵⁾는 비등 열전달의 핵비등항이 제외된 대류항과 막응축과의 유사성과 물, R11, R12, R22, 벤젠, 톨루엔 등 많은 유체를 사용한 실험자료를 근거로 상관식을 제시하였다. 비교적 최근에는 Chen *et al.*⁽⁶⁾이 문헌의 이론적인 해석을 통하여 관내 응축에 대한 포괄적인 상관식을 제시하였고, Chitti and Anand⁽⁷⁾는 적절한 무차원 변수를 도입하고 Prandtl의 mixing length와 Van-Driest의 식, 그리고 Reynolds의 상사성을 이용하여 해석적인 방법으로 환상류에 대한 열전달계수를 예측하였으며, R22를 사용한 자신의 실험결과와 비교하였다. 국내에서도 Kwak *et al.*⁽⁸⁾이 해석적인 방법으로 환상유동 영역에서의 응축 열전달계수를 예측하였으며, Suh *et al.*⁽⁹⁾은 R407C와 R410A를 대상으로 벽면 과냉도의 변화에 따른 응축 열전달계수의 변화를 관찰하였다. 응축 열전달은 액상과 기상이 함께 흐르면서 기상의 냉매가 응축되어 액상으로 바뀌는 현상으로서, 유동 양식에 따라 그 열전달 특성이 많이 다르게 되므로 유동 양식을 파악하는 것은 매우 중요하다. Soliman⁽¹⁰⁾은 환상류와 분무류를 자신이 제시한 무차원수를 기준으로 구분하고, 타 연구자의 실험 결과를 이용하여 각 영역에서의 열전달 상관식을 제시하였으며, Tandon *et al.*⁽¹¹⁾은 Wallis에 의해 제안된 무차원화된 가스 속도와 수정된 공극률을 사용하여 유동 양식을 판별하였다. Tandon *et al.*⁽¹²⁾은 R12와 R22의 실험을 바탕으로 기상의 Reynolds수를 기준으로 환상류와 파형류를 구분할 수 있음을 보이고, 각 영역에 대하여 열전달 상관식을 제시하였다.

전술한 바와 같이 많은 연구자들이 다수의 불화 수소 냉매에 대하여 응축 열전달 실험을 수행하였으나, 암모니아를 사용한 실험 결과는 널리 알려져 있지 않다. 이에 자극을 받은 Ohadi *et al.*⁽¹³⁾은 순수 암모니아에 대한 기존의 실험 자료들을 분야별로 정리하여 상세히 기술한 바 있다.

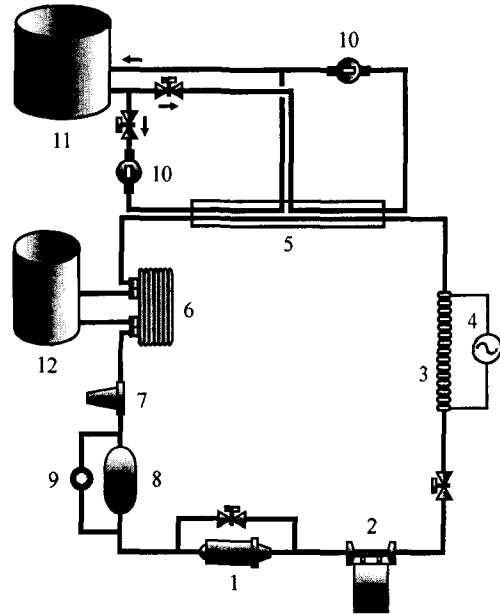
그러나 그들은 암모니아의 수평관내 응축에 관하여 Chepurmenko *et al.*⁽¹⁴⁾의 실험 결과만을 소개하고 있는데, 이를 살펴보면 매우 작은 질량유속 범위(0.68-17.8 kg/m²·s)에 대한 평균열전달계수 측정에 국한되었고 실험 결과가 무차원수 형태로 제시되지 않아 사실상 수평관 내에서 암모니아의 강제 대류 응축 현상을 만족스럽게 설명하지는 못하였다. 또한 그들은 그들의 글에서 대부분의 암모니아를 사용한 이상 유동 실험이 불화수소 냉매들의 실험과 비교하여 여러 가지 어려움으로 인하여 실험 조건의 범위가 다소 좁고 불확실성이 커서 좀더 포괄적인 연구가 필요한 실정이라고 밝히고 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 순수 암모니아를 작동 유체로 하여 단상 열전달계수와 응축 열전달계수를 실험적으로 구한 후, 그 실험 결과를 다른 물질의 측정값으로부터 구해진 기존의 상관식들이 예측하는 값과 비교하여 이들 식이 암모니아에도 적용 가능한지의 여부를 살폈다.

2. 실험장치, 방법 및 조건

2.1 실험 장치

Fig. 1은 전체 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 시험부(test section), 냉매 순환부, 물 순환부의 3부분으로 이루어져 있다. 실제 열전달계수를 측정할 시험부는 외경 9.52 mm(3/8 inch), 두께 0.9 mm의 수평 스테인레스 스틸관과 그것을 둘러싸고 있는 외경 19.05 mm(3/4 inch), 두께 1.07 mm의 동관으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 전체 시험부의 유효길이를 4 m로 하고, 이것을 4부분으로 균등하게 나누어서 각 부분에 대한 ‘평균 열전달계수’를 측정하였다. 냉매 순환부는 냉매 순환 펌프, 가열기, 열교환기 등으로 구성되어 있다. 냉각기에 의해 냉각된 물과 열교환을 한 후 과냉된 냉매는 어큐물레이터에 모이고 순환 펌프에 의해 순환된다. 냉매는 시험부에 들어가기에 앞서 전기 가열기를 통과하며, 여기에서 시험부에서 필요로 하는 입구 조건으로 제어된다. 시험부를 통과하는 냉매와 열교환을 시키기 위하여 항온조에 의해 온도가 균일하게 유지되는 물을 펌프를 사용하여 순환시켰다.



- 1 Pump
- 2 Mass flow meter
- 3 Electric heater
- 4 Variable voltage transformer
- 5 Test section
- 6 Heat exchanger
- 7 Filter
- 8 Accumulator
- 9 Sight glass
- 10 Flow meter
- 11 5RT water chiller
- 12 3RT water chiller

Fig. 1 Schematic diagram of an experimental apparatus.

2.2 실험 방법

우선 진공 펌프를 사용하여 시스템을 약 5 Pa의 진공 상태로 만든 후 냉매를 충전하였다. 냉매의 주입량은 냉매 순환 펌프 앞에 위치한 어큐물레이터에 설치된 가시 유리창을 보면서 어큐물레이터에 일정량 이상의 냉매액이 충전되어 정상 상태에서 펌프 입구에 기체가 들어가지 않도록 그 양을 결정하였다. 그후 냉매 및 물의 온도와 유량, 가열기에 공급되는 전력 등을 조절하여 원하는 실험 조건에서 시스템이 정상상태에 이르도록 하였다. 냉매의 유량은 coriolis 형식 질량 유량계를 사용하여 펌프 출구에서 측정하였고, 시험부에 공급되는 물의 유량은 보정된 체적 유량계를 사용하여 측정하였다. 냉매의 압력은 시험부에서 입구와 출구를 포함하여 6곳에서 측정하

였는데, 시험부의 입구와 출구는 절대압력계를, 나머지 4곳은 3-방향 밸브를 4개 설치하여 차압 계로 측정하였다. 냉매의 온도 측정에는 T형 열전대를 사용하였으며, 물의 온도 측정에는 T형 열전대 및 5배 증폭의 열전과일(thermopile)을 사용하였다. 온도, 압력, 유량 및 모든 신호는 데이터 취득 시스템에 의해 측정되어 NI사의 Lab-view 프로그램에 의해 PC 화면에 표시 및 저장되었다. 측정된 온도, 압력 및 유량을 통해 1 m 시험부에서의 총열전달계수 U_o 가 식(1)에 의해 얻어지고, 오염에 의한 열저항을 무시하면 냉매 측의 열전달계수 h_i 는 식(2)에 의해 결정된다.

$$U_o = \frac{Q_w}{A_o \cdot \text{LMTD}} \quad (1)$$

$$h_i = \left(\frac{1}{U_o} - \frac{1}{h_o} - \frac{x A_o}{k A_m} \right)^{-1} \cdot \frac{A_o}{A_i} \quad (2)$$

식(2)에서 h_o 는 환상 공간을 지나는 물의 열전달계수로서, 환상 공간에 적용 가능한 기존의 상관식을 사용하여 계산할 수도 있으나, 시험부의 형상에 따른 entry effect 등에 의한 오차가 예상되므로 보다 정확한 h_o 를 구하기 위하여 수정된 윌슨 플롯법⁽¹⁵⁾을 이용하였다. 이를 위하여 시험부와 형상이 동일한 이중관 열교환기와 별도의 실험 장치를 제작하여 총 18회의 실험을 수행하였다. 내관의 열전달계수와 환상 영역의 열전달계수를 Reynolds수와 Prandtl수, 그리고 반경 방향의 물성치 변화를 고려한 Sieder and Tate⁽¹⁶⁾의 수정항으로 표시할 수 있다고 생각하면 식(3)과 (4)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$h_i = C_i \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \frac{k_i}{D} \left(\frac{\mu_{i,w}}{\mu_{i,m}} \right)^{-0.14} \quad (3)$$

$$h_o = C_o \text{Re}^d \text{Pr}^{0.4} \frac{k_o}{D_h} \left(\frac{\mu_{o,w}}{\mu_{o,m}} \right)^{-0.14} \quad (4)$$

식(3)과 (4)를 선형화 하면 식(5)~(9)와 같다.

$$X_n = \left[\frac{[\text{Re}^d \text{Pr}^{0.4} Ak/D_h]_o}{[\text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} Ak/D]_i} \right]$$

$$\times \left[\frac{(\mu_w/\mu_m)_o^{-0.14}}{(\mu_w/\mu_m)_i^{-0.14}} \right]_n \quad (5)$$

$$Y_n = \left[\left[\frac{1}{UA} - R_w \right] [\text{Re}^d \text{Pr}^{0.4} Ak/D_h]_o \times \left[\frac{\mu_w}{\mu_m} \right]_o^{-0.14} \right]_n \quad (6)$$

$$y_{o,n} = \left[\frac{1}{UA} - R_w - \frac{1}{C_i [\text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} Ak/D]_i} \times \frac{1}{(\mu_w/\mu_m)_i^{-0.14}} \right]_n$$

$$\times [(\text{Pr}^{0.4} Ak/D_h)_o (\mu_w/\mu_m)_o^{-0.14}]_n \quad (7)$$

$$[Y_n] = \frac{1}{C_i} [X_n] + \frac{1}{C_o} \quad (8)$$

$$\left[\ln \frac{1}{y_{o,n}} \right] = d [\text{Re}_{o,n}] + \ln C_o \quad (9)$$

윌슨 플롯 실험 결과를 식(5)~(9)에 대입하여 수렴시키면 Fig. 2와 Fig. 3의 수렴 결과를 얻을 수 있으며, 이들은 각각 내관에 대한 윌슨 플롯과 환상 공간에 대한 윌슨 플롯을 나타낸다. 환상 공간에 대한 윌슨 플롯의 기울기와 y절편으로부터 식(4)의 C_o 와 d 를 얻을 수 있고, h_o 는 식(10)과 같이 결정된다.

$$h_o = 0.0021 \text{Re}^{0.9365} \text{Pr}^{0.4} \frac{k_o}{D_h} \left(\frac{\mu_{o,w}}{\mu_{o,m}} \right)^{-0.14} \quad (10)$$

2.3 실험 조건

응축 실험에 앞서 단상 열전달 실험을 수행하였으며, 응축 및 단상 열전달 실험 조건을 Table 1에 나타내었다. 단상 실험은 과냉액 상태의 암모니아에 대하여 환상 공간을 지나는 물의 온도를 냉매의 온도보다 낮게 하고 냉매의 질량 유속을 변화시키면서 수행하였고, 응축 실험은 냉매의 포화 온도와 질량 유속을 변화시키며 수행하였다. 실험에 사용된 암모니아는 미국 Solkrotonic Chemical사의 제품으로 순도는 99.999%이며, 본 연구에 사용된 모든 물성치는 미국 F-chart software사의 EES(Engineering Equation Solver) version 4.455를 사용하여 구하였다.

본 연구의 온도, 유량 및 압력 측정의 불확실

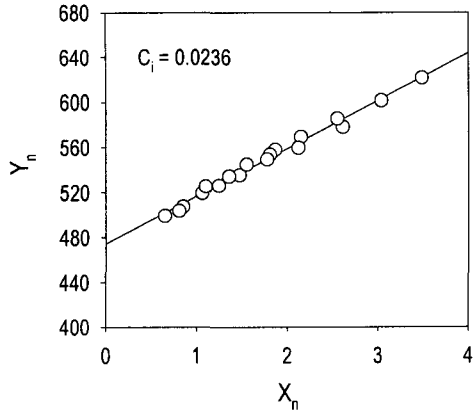


Fig. 2 A tube side Wilson plot.

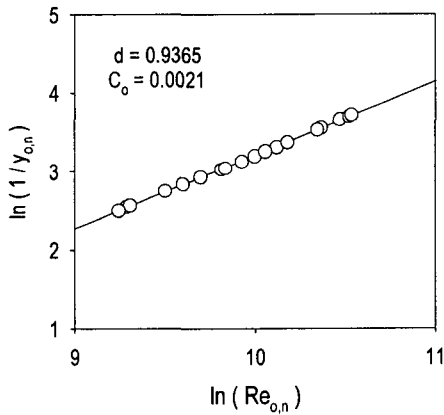


Fig. 3 An annulus side Wilson plot.

성은 각각 0.5℃, 1.0%, 0.5%로 계산하였으며, 단상 실험에 대하여 시험부에서 열평형의 평균오차는 3.7%이고 최대오차는 8.4%였다. Kline and McClintock⁽¹⁷⁾이 정리한 오차전파 방법을 사용하여 계산한 단상 및 응축 열전달계수의 평균 불확실성은 각각 15.8%, 14.0%, 그리고 불확실성의 최대값은 각각 18.9%, 21.7%였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 질량 유속과 평균 온도의 변화에 따른 단상 열전달계수의 변화를 나타내었다. 단상 열전달계수는 질량유속과 온도의 상승에 따라 증가함을 알 수 있다. 질량유속이 크면 운동량이 크고 온도가 높으면 점도가 감소하여 열전달 향

Table 1 Experimental condition

	Sub. liq.	Condensation
Mass flux [kg/m ² · s]	320 ~ 501	86 ~ 128
Temperature [℃]	18 ~ 47	34 ~ 47
Pressure [kPa]	1895 ~ 1908	1297 ~ 1903
Heat flux [kW/m ²]	12.1 ~ 38.2	38.6 ~ 62.6
Average quality		0.1 ~ 0.9

상의 요인이 된다. Fig. 5는 실험을 통하여 얻은 단상 열전달계수 데이터와, 단상 유동의 열전달 특성을 잘 설명한다고 알려진 Gnielinski⁽¹⁸⁾의 상관식을 사용하여 예측한 열전달계수를 서로 비교하여 나타낸 것이다. Gnielinski의 상관식을 적용하는데 있어서 벽면과 유체 사이에는 유한한 온도차가 있기 마련이므로, Petukhov⁽¹⁹⁾에 의해 제안된 수정항을 사용하였다. 그 결과, Gnielinski의 상관식은 약 10%의 오차 범위 내에서 열전달계수의 경향을 잘 예측하였다. Fig. 6은 Tandon *et al.*⁽¹¹⁾이 제안한 방법을 사용하여 응축 과정에서의 유동 양식을 예측한 것이다. 응축이 진행됨에 따라 분무류 근처의 영역에서부터 환상류, 파형류 순으로 유동 양식이 변화하는 것을 예측하고 있으며, 그 경향이 정성적으로 타당하다고 판단된다. Fig. 7은 질량유속과 건도에 따른 응축 열전달계수의 변화를 나타낸다. 응축 열전달계수는 질량유속이 증가함에 따라 증가하고, 건도가 감소함에 따라 감소함을 알 수 있다. 응축이 진행됨에 따라 건도가 감소하면 액막이 두꺼워지므로 열저항이 증가하고 기상에서 액상으로 바뀌면서 체적이 현저히 감소하여 유체의 속도가 감소하므로 벽면에서 전단력이 감소한다. 저건도 영역에서는 질량 유속의 증가에 따른 열전달계수의 증가가 미미한데, 이에 관하여 Dobson *et al.*⁽²⁰⁾은 파형류의 특성에 따른 것으로 설명하였다. Fig. 8은 포화온도의 변화에 따른 응축 열전달계수의 변화를 나타낸다. 포화온도가 증가하면 열전달계수가 감소하는데, 이는 포화온도가 증가할수록 액상의 열전도율이 감소하고, 기상에 대한 액상의 밀도비가 감소하여 액상속도에 대한 기상의 속도비가 감소하기 때문이다. Fig. 9는 본 연구의 실험 결과로 얻은 응축 열전달계수와 기존

의 상관식을 사용하여 예측한 응축 열전달계수를 서로 비교하여 나타낸 것이고, Fig. 10은 양자의 평균오차를 건도에 따라 도시한 것이다. 암모니아의 실험 결과를 바탕으로 하지 않는 기존의 상관식들은 열전달계수 변화의 정성적인 경향은 잘 예측하였으나, 정량적으로는 만족스럽지 못하였다. 여러 상관식 중 본 연구의 응축 실험결과를 정량적으로 가장 잘 예측한 상관식은 Chen *et al.*⁽⁶⁾의 식으로 평균절대오차는 11.6%이며, 평균절대오차의 표준편차는 10.2%이다. 본 연구의 단상 및 응축 실험 결과를 바탕으로, 암모니아의 실험 결과를 바탕으로 하지 않는 기존의 상관식에 비하여 열전달계수를 정확히 예측하기 위한 상관식을 제시하고자 한다. 상관식의 형태는 단상 열전달의 경우 Dittus and Boelter⁽²¹⁾가 제안한 것으로 하였고 응축의 경우 Cavallini and Zecchin⁽⁴⁾이 제안한 것으로 하였으며, 비례상수와 Reynolds수 포함한 항의 지수를 미지수로 하여, 실험을 통하여 얻어진 Nusselt수와 계산된 Nusselt수의 상대오차가 최소가 되도록 하는 미지수들을 비선형 회귀분석을 통하여 결정하였다. 식(11)은 회귀분석 결과 얻은 단상 열전달 상관식이고, Fig. 11은 실험을 통하여 얻은 열전달계수와 식(11)을 사용하여 계산한 열전달계수를 서로 비교한 것이다. 식(12)와 Fig. 12는 같은 방법으로 응축에 대하여 얻은 결과이다. 식(12)에서 Re_{eq} 은 식(13)과 같이 정의되며, 식(13)에서 Re_v 와 Re_l 은 식(14)와 같이 정의된다. 본 연구에서 제시한 상관식으로 예측한 단상 열전달계수의 평균절대오차는 1.0%, 평균절대오차의 표준편차는 0.7%였으며, 응축 열전달계수의 경우 평균절대오차와 그 표준편차가 각각 4.9%, 4.1%였다.

$$h_{i,s} = 0.030 Re^{0.77} Pr^{0.4} \frac{k}{D_i} \quad (11)$$

$$h_{i,c} = 0.046 Re_{eq}^{0.77} Pr_l^{0.33} \frac{k_l}{D_i} \quad (12)$$

$$Re_{eq} = Re_v \left(\frac{\mu_v}{\mu_l} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.5} + Re_l \quad (13)$$

$$Re_v = \frac{Gx D_i}{\mu_v}, \quad Re_l = \frac{G(1-x) D_i}{\mu_l} \quad (14)$$

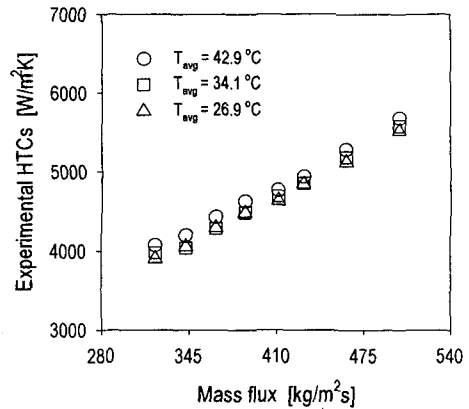


Fig. 4 Variation of single phase HTCs with respect to mass flux.

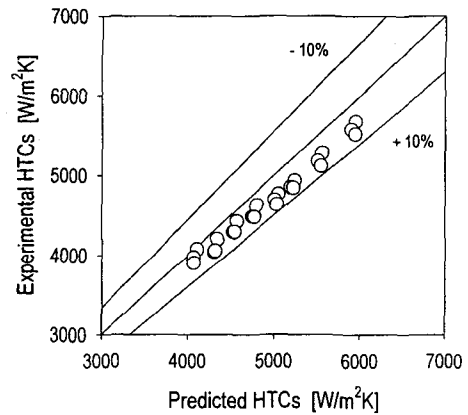


Fig. 5 Comparison of experimental HTCs with predicted HTCs by Gnielinski.

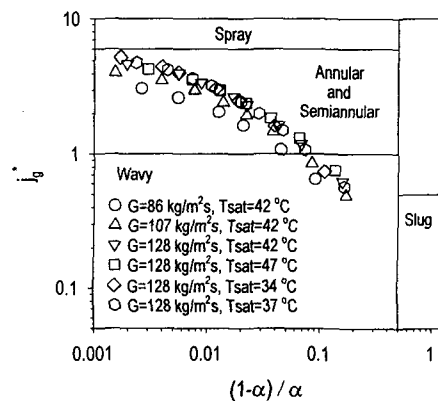


Fig. 6 Tandon's flow pattern map based on experimental data.

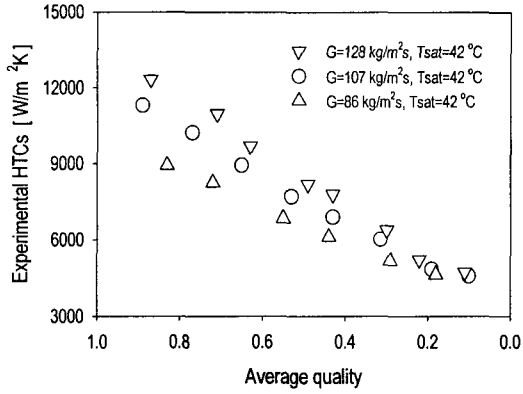


Fig. 7 Variation of condensation HTCs with respect to mass flux.

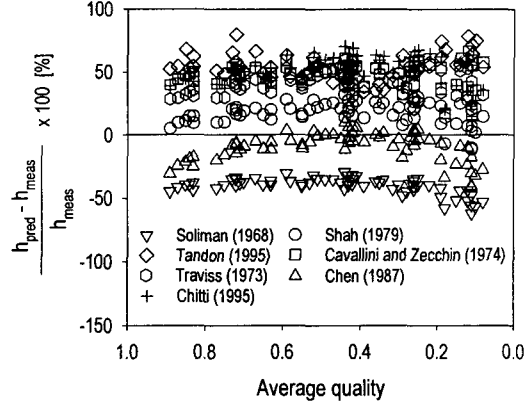


Fig. 10 Average deviation between experimental HTCs and predicted HTCs.

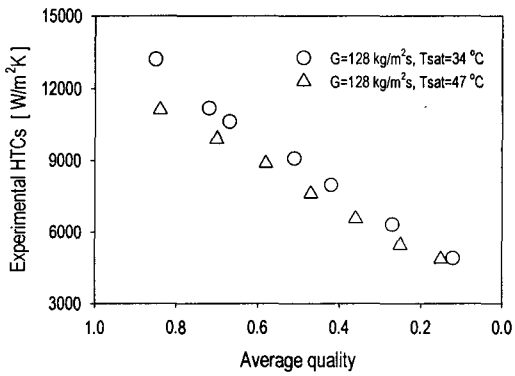


Fig. 8 Variation of condensation HTCs with respect to saturation temperature.

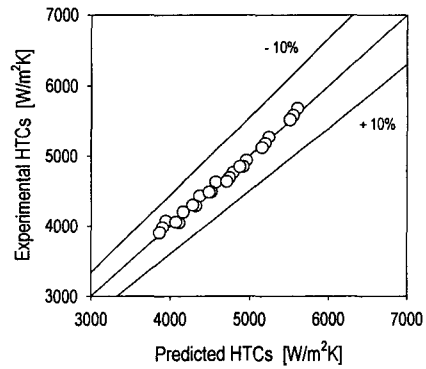


Fig. 11 Comparison of experimental single phase HTCs with the correlation proposed in this study.

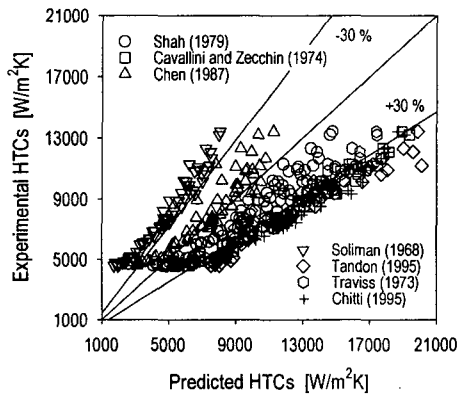


Fig. 9 Comparison of experimental HTCs with predicted HTCs.

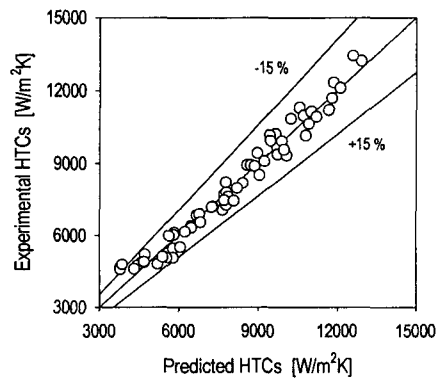


Fig. 12 Comparison of experimental condensation HTCs with the correlation proposed in this study.

4. 결론

수평 원관 내의 순수 암모니아에 대하여 질량 유속과 온도를 변화시키며 과냉액 상태에서의 단상 열전달계수와 응축 열전달계수를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 과냉액 상태에서의 단상 열전달계수는 질량유속과 온도의 상승에 따라 증가하며, Gnielinski⁽¹⁸⁾의 상관식은 약 10%의 오차 범위 내에서 열전달계수의 경향을 잘 예측하였다.

(2) 응축 열전달계수는 질량유속과 건도가 감소함에 따라 감소하고, 포화온도가 증가하면 감소한다. 또한, 저건도에서는 질량유속의 변화에 따른 열전달계수의 변화가 작다.

(3) Tandon *et al.*⁽¹¹⁾의 방법은 암모니아의 응축에 대해서도 유동 양식의 변화를 정성적으로 잘 예측하는 것으로 판단된다.

(4) 본 연구의 응축 실험결과를 정량적으로 가장 잘 예측한 상관식은 Chen *et al.*⁽⁶⁾의 식으로 평균절대오차는 11.6%이며, 평균절대오차의 표준편차는 10.2%이다.

(5) 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 상관식을 제시하였고, 이를 사용하여 예측한 단상 열전달계수의 평균절대오차는 1.0%, 평균절대오차의 표준편차는 0.7%였으며, 응축 열전달계수의 경우 평균절대오차와 그 표준편차가 각각 4.9%, 4.1%였다.

참고문헌

- Ananiev, E. P., Boyko, L. D., and Kruzhilin, G. N., 1961, Heat transfer in the presence of steam condensation in a horizontal tube, Proc. 1st Int. Heat Transfer Conf., Part 2, p. 290.
- Soliman, M., Schuster, J. R., and Berenson, P. J., 1968, A general heat transfer correlation for annular flow condensation, J. Heat Transfer, Vol. 90, pp. 267-276.
- Traviss, D. P., Rohsenow, W. M., and Baron, A. B., 1973, Forced convection condensation in tubes: A heat transfer correlation for condenser design, ASHRAE Trans., Vol. 79, Part 1, pp. 157-165.
- Cavallini, A. and Zecchin, R., 1974, A dimensionless correlation for heat transfer in forced convection condensation, Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 3, pp. 309-313.
- Shah, M. M., 1979, A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 547-556.
- Chen, S. L., Germer, F. M., and Tien, C. L., 1987, General film condensation correlations, Exp. Heat Transfer, Vol. 1, pp. 93-107.
- Chitti, M. S. and Anand, N. K., 1995, An analytical model for local heat transfer coefficients for forced convective condensation inside smooth horizontal tubes, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 4, pp. 615-627.
- Kwak, K. M., Bai, C. H., Chung, M., and Lee, S. C., 1998, Prediction of condensation heat transfer coefficients inside horizontal tube in annular flow regime, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 732-742.
- Suh, J. H. and Kim, M. S., 1999, Condensation heat transfer of R407C and R410A in a horizontal tube, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 5, pp. 633-641.
- Soliman, H. M., 1982, On the annular-to-wavy flow pattern transition during condensation inside horizontal tubes, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 60, pp. 475-481.
- Tandon, T. N., Varma, H. K., and Gupta, C. P., 1982, A new flow regimes map for condensation inside horizontal tubes, J. Heat Transfer, Vol. 104, pp. 763-768.
- Tandon, T. N., Varma, H. K., and Gupta, C. P., 1995, Heat transfer during convection condensation inside horizontal tube, International Journal of Refrigeration, Vol. 18, No. 3, pp. 210-214.

13. Ohadi, M. M., Li, S. S., Radermacher, R., and Dessiatoun, S., 1996, Critical review of available correlations for two-phase flow heat transfer of ammonia, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, No. 4, pp. 272-284.
14. Chepurmenko, V. P., Lagutin, A. E., and Gogol, N. I., 1993, An investigation of heat exchange during condensation of ammonia inside a pipe at low heat flow densities, Energy efficiency in refrigeration and global warming impact, *Proceedings of Refrigeration Science and Technology Belgium*, May 1993, Int. Institute of Refrig., Commissions B1/2, pp. 243-249.
15. Shah, R. K., 1990, Assessment of modified Wilson plot techniques for obtaining heat exchanger design data, *Heat Transfer 1990*, Vol. 5, pp. 51-56.
16. Sieder, E. N. and Tate, G. E., 1936, *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 28, p. 1429.
17. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, *Mech. Eng.*, Vol. 75, pp. 3-8.
18. Gnielinski, V., 1976, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *International Chemical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 359-368.
19. Petukhov, B. S., 1970, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 6, Academic Press, pp. 503-564.
20. Dobson, M. K., Chato, J. C., Hinde, D. K., and Wang, S. P., 1994, Experimental evaluation of internal condensation of refrigerants R12 and R134a, *ASHRAE Trans.*, Vol. 100, Part 1, pp. 744-755.
21. Dittus, P. W. and Boelter, L. M. K., 1930, *University of California Publications on Engineering*, Vol. 2, No. 13, pp. 443-461.