

수평원관 내 이산화탄소의 증발열전달 특성 연구

조은석* · 윤석호* · 김민수**

A Study on the Characteristics of Evaporative Heat Transfer for Carbon Dioxide in a Horizontal Tube

E. S. Cho, S. H. Yoon and M. S. Kim

Key Words: Natural Refrigerant(천연냉매), Carbon Dioxide(이산화탄소), Evaporative Heat Transfer Coefficient(증발 열전달계수)

Abstract

Evaporative heat transfer characteristics of carbon dioxide has been investigated. Experiment has been carried out for seamless stainless steel tube with outer diameter of 9.55 mm and inner diameter of 7.75 mm. Direct heating method is used for supplying heat to the refrigerant was uniformly heated by electric current which was applied to the tube wall. The saturation temperature of refrigerant is calculated from the measured saturation pressure by using an equation of state. Inner wall temperature was calculated from measured outer wall temperature, accounting for heat generation in the tube and heat conduction through the tube wall. Mass quality of refrigerant was calculated by considering energy balance in the preheater and the test section. Heat fluxes were set at 12, 16, 20, 23, and 27 kW/m², mass fluxes were controlled at 212, 318, 424, and 530 kg/m²s, and saturation temperature of refrigerant were adjusted at 0, 3.4, 6.7 and 10.5°C.

From this study, heat transfer coefficients of carbon dioxide have been provided with respect to quality for several mass fluxes, heat fluxes. Finally, the experimental results in this study are compared with the correlation by Gungor and Winterton(1987).

기호설명

w_i 시험부의 내벽면

w_o 시험부의 외벽면

G 질량유속 [kg/m²s]
 h 열전달계수 [W/m²K]
 P 압력 [kPa]
 q'' 열유속 [kW/m²]
 T 온도 [K]
 x 건도

1. 서론

기존의 CFC 및 HCFC 계열의 냉매를 대신할 수 있는 환경친화적인 대체냉매에 대한 연구는 냉동 및 공조 분야의 중요한 연구과제이다. 대체냉매로 개발된 HFC 계열의 냉매는 지구온난화 지수가 높고 기존의 시스템에 그대로 사용할 경우 성능이 저하되는 문제가 있어 많은 연구자들이 환경적인 문제를 거의 야기시키지 않는 HC 계열, 이산화탄소, 암모니아 등의 천연냉매를 대안으로 제시하고 있다. 이들 중, 이산화탄소는 암

하첨자

sat 포화상태

* 회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

모니아에 비해 독성이 없고, HC 계열의 냉매와 달리 가연성이 없으며, 상대적으로 가격이 저렴하고 구하기 쉬운 장점이 있다.⁽¹⁾ 또한, 최근들어 냉동 및 공조기가 소형화되는 경향에 따라 단위체적당 냉동능력이 커서 열교환기의 소형화에 유리한 이산화탄소가 새로운 대체냉매로 부각되고 있다.⁽²⁾

이산화탄소를 이용한 냉동시스템의 열교환기를 설계함에 있어서 열전달특성을 파악하는 것이 가장 중요하다. 이산화탄소의 열전달특성에 관한 연구는 90년대 후반에 들어 조금씩 이루어지고 있으나,⁽³⁾ 포화압력이 매우 높기 때문에 고압시스템을 구성해야 하고, 임계온도가 낮아서 냉동사이클이 초임계상태를 포함하므로⁽⁴⁾ 아직까지는 많은 연구가 이루어지는 않았다. 또한, 이산화탄소의 증발열전달 특성에 대해서는 지금까지 연구된 바가 거의 없는 실정이다.

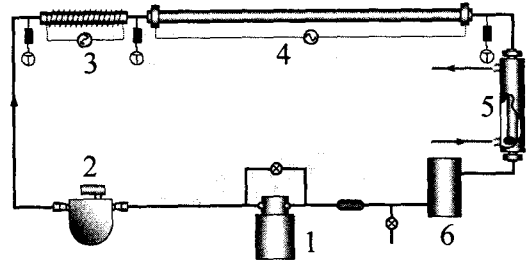
본 연구에서는 이산화탄소에 대하여 포화온도, 열유속, 질량유속을 변화시키면서 증발과정 중의 열전달계수의 변화를 고찰하고자 한다. 시험부는 외경 9.55 mm, 내경 7.75 mm인 스테인레스 스틸관을 사용하였고, 관에 직접 전기를 흘려 가열하는 방식을 사용하였다. 또한 본 실험에서 측정된 열전달계수를 기존의 증발열전달 상관식과 비교하여 그 적용 가능성을 살펴보았다.

2. 이산화탄소의 증발열전달 실험

2.1 실험 장치

실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 마그네틱 기어펌프, 질량유량계, 예열기, 시험부, 수액기, 열교환기로 구성되어 있다. 마그네틱 기어펌프는 이산화탄소를 순환시키며, 질량유량계를 이용하여 이산화탄소의 유량을 측정한다. 질량유량계를 통과한 이산화탄소는 예열기에서 건도가 조절된 후 시험부로 들어가며, 시험부에서 증발과정을 거친 후, 열교환기를 지나면서 응축된 후 수액기로 들어간다. 수액기에 모인 과냉상태의 이산화탄소는 다시 펌프로 유입된다.

시험부는 외경 9.55 mm, 두께 0.90 mm인 스테인레스 스틸 원관을 사용하였으며 일정 열유속 조건을 위하여 관에 직접 전기를 흘려 발생하는 열로 냉매를 가열하는 방식을 택하였다. 시험부



1: magnetic gear pump, 2: mass flowmeter, 3: preheater, 4: test section, 5: heat exchanger, 6: liquid receiver

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

는 절연피팅(dielectric fitting)으로 시스템과 절연되며, 길이는 5 m이다. 시험부에는 1 m 간격으로 압력탭을 설치하였으며, 벽면온도를 측정하기 위하여 50 cm 간격으로 10곳의 상, 하, 좌, 우 4위치에 T형 열전대를 부착하였다.

냉매의 열전달계수를 구하기 위해서는 시험부에 공급되는 열유속, 냉매의 포화온도, 시험부의 내벽면 온도를 알아야 한다. 냉매의 포화온도는 시험부의 포화압력을 측정된 후, 물성계산 프로그램인 REFPROP⁽⁵⁾을 이용하여 계산하였다. 시험부의 내벽면 온도는 외벽면에 열전대를 부착하여 온도를 측정된 후, 관벽을 통한 전도를 고려하여 계산하였다. 시험부에 공급되는 열량은 전력계로 측정하였다. 온도, 압력센서와 질량유량계의 신호는 다채널 기록기로 전송되어 GPIB통신으로 컴퓨터에 기록된다.

2.2 실험 조건

증발열전달에 큰 영향을 미치는 변수인 질량유속을 212, 318, 424 및 530 kg/m²s로 변화시키고 열유속을 12, 16, 20, 23 및 27 kW/m²로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 냉매의 포화온도를 0, 3.4, 6.9 및 10.5°C로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과

열유속 변화에 따른 증발 열전달계수를 Fig. 2에 나타내었다. 열유속이 커짐에 따라 열전달계

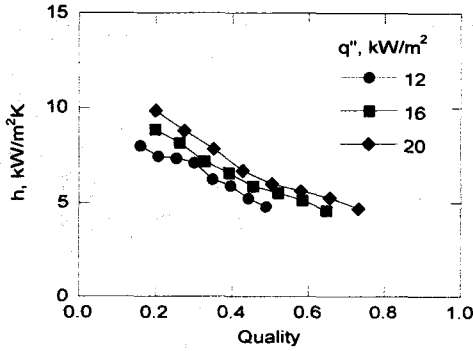


Fig. 2 Variation of heat transfer coefficient with respect to heat flux
($G=318 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_{sat}=3.4^\circ\text{C}$)

수가 커지는 경향을 보이고 있으며, 모든 열유속 조건에 대해서 증발이 진행되어 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 열전달계수의 감소는 Fig. 3에 나타낸 원주방향 국소 열전달계수의 변화로 설명된다. 일반적으로 건도가 증가함에 따라 환상유동이 형성되고 중력의 영향에 의해 상부 액막이 얇아지면서 큰 열전달의 향상을 보이게 되는데,⁽⁶⁾ 본 실험에서는 상부의 열전달계수가 증발초기에는 가장 큰 값을 가지다가 증발이 진행되면서 급속히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 이산화탄소의 경우 본 연구의 온도조건에서 표면장력과 점성이 R22와 R134a 등의 기존 냉매에 비해 매우 작기 때문에 증발이 진행됨에 따라 액막이 부분

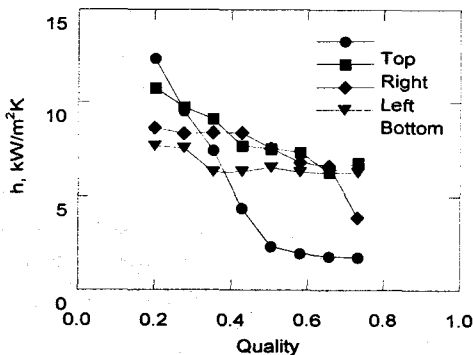


Fig. 3 Variation of circumferential heat transfer coefficient with respect to quality ($G=318 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q''=20 \text{ kW/m}^2$, $T_{sat}=3.4^\circ\text{C}$)

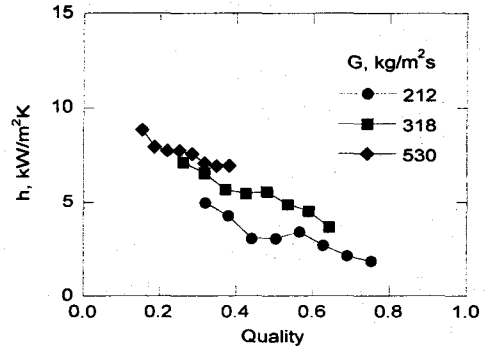


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient with respect to mass flux
($q''=12 \text{ kW/m}^2$, $T_{sat}=10.5^\circ\text{C}$)

적으로 깨지기 시작하여 기상의 이산화탄소가 관벽에 직접 접촉하면서 열전달이 크게 저하되기 때문이다. 따라서 증발이 진행될수록 기상의 접촉면적이 커지면서 열전달계수가 감소하게 된다.

Fig. 4에서는 질량 유속이 변화될 때의 열전달 계수 변화를 보여주고 있다. 질량 유속이 커짐에 따라 열전달계수도 커지는 경향을 보였다. 이는 질량 유속이 증가하면 레이놀즈수가 증대되어 이산화탄소 분자들이 관벽에 접촉할 기회가 많아져 열전달이 촉진되기 때문이다.

본 연구의 실험결과를 순수물질에 대한 증발 열전달 상관식으로 비교적 넓은 범위에서 쓰이고 있는 Gungor와 Winterton(1987)의 상관식⁽⁷⁾과 비교해 보고, 이산화탄소에 대한 적용 가능성에 대해 고찰해 보았다. Fig. 5에는 포화 온도 10.5°C 에서 측정된 열전달계수와 Gungor와 Winterton(1987)의 상관식으로 계산한 열전달계수의 차이를 나타내었다. Gungor와 Winterton(1987)의 상관식은 이산화탄소의 열전달계수를 평균 38.6% 작게 예측하고 있으며 건도가 낮을수록 더욱 큰 오차를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 환경친화적인 천연냉매로 부각되고 있는 이산화탄소를 대상으로 증발열전달 특성을 열유속, 질량유속을 변화시키면서 고찰하였으며, 기존의 상관식과 실험결과를 비교하여 그

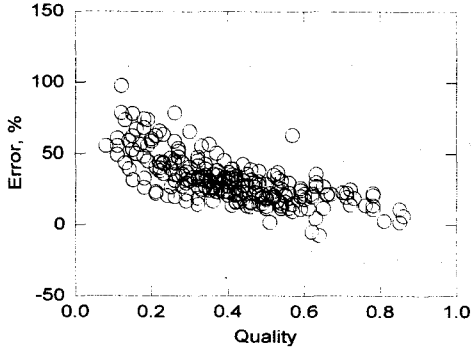


Fig. 5 Comparison of measured heat transfer coefficient with the correlation by Gungor and Winterton(1987)
 $(Error=(h_{meas}-h_{pred})/h_{pred} \cdot 100(\%))$

적용가능성에 대해 살펴보았다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 증발이 진행되어 건도가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 본 연구의 실험조건에서 이산화탄소의 표면장력과 점성이 R22와 R134a 등의 기존 냉매에 비해 매우 작기 때문에 건도의 증가에 따라 액막의 두께가 얇아지면서 액막이 고르게 형성되지 못하고 증류의 영향으로 인하여 관 상부에서부터 과열되어 기상의 이산화탄소가 관벽에 직접 접촉하게 되어 열전달 효과를 크게 감소시키기 때문이다.

(2) 질량유속이 증가함에 따라 레이놀즈수의 증대로 인해 열전달계수가 증가하는 경향을 보였다.

(3) 열유속이 커짐에 따라 핵비동의 영향이 증대되어 열전달계수가 증가하였으며, 이산화탄소는 거의 모든 건도범위에서 열유속의 영향을 받았다.

(4) 본 실험의 결과를 순수 물질에 대한 유동 증발 열전달 상관식인 Gungor와 Winterton(1987)의 상관식과 비교하였다. 상관식에서 예측한 값은 본 연구의 실험결과보다 작은 값을 예측하고 있으며, 최고 98.0%, 평균 38.6%의 오차를 가졌다. 이는 기존의 상관식으로는 이산화탄소의 열전달계수를 예측하는 것이 힘들다는 것을 의미하며, 따라서 앞으로 이산화탄소의 증발열전달 계수를 예측하는 새로운 상관식의 개발이 필요하다.

본 연구는 한국과학재단(과제번호 1999-1-304-006-3)의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

- (1) Pitla, S. S., Robinson, D. M., Groll, E. A., and Ramadhyani, S., 1998, "Heat Transfer from Supercritical Carbon Dioxide in Tube Flow : A Critical Review", 1998, HVAC&R research, Vol. 4, No. 3, pp. 281-301.
- (2) Pettersen, J., Hafner, A., Skaugen, G., and Rekstad, H., 1998, "Development of Compact Heat Exchangers for CO₂ Air-Conditioning Systems", Int. J. Refrig., Vol. 21, No. 3, pp. 180-193.
- (3) Robinson, D. M. and Groll, E. A., 1998, "Heat Transfer Analysis of Air-to-Carbon Dioxide Two-Phase Heat Absorption and Supercritical Heat Rejection", HVAC&R Research, Vol. 4, No. 4, pp. 327-345.
- (4) Hwang, Y. and Radermacher, R., 1998, "Theoretical Evaluation of Carbon Dioxide Refrigeration Cycle", HVAC&R research, Vol. 4, No. 3, pp. 245-263.
- (5) McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W., and A. P. Peskin, 1998, NIST Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP), Version 6.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- (6) 신지영, 김민수, 노승탁, 1996, "순수 및 혼합 냉매의 원관내 증발열전달 실험", 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제2호, pp. 730-740.
- (7) Gungor, K. E. and Winterton, R. H. S., 1987, "Simplified General Correlation for Flow Saturated Boiling and Comparisons of Correlations with Data", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 65, pp. 148-156.