

이산화탄소의 초임계 가스냉각 과정의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구

윤 석 호, 김 주 혁*, 김 민 수**

LG전자 디지털 어플라이언스 연구소, *서울대학교 기계항공공학부

Experimental Studies on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics during Gas Cooling Process of Carbon Dioxide in the Supercritical Region

Seok Ho Yoon, Ju Hyok Kim*, Min Soo Kim**

Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc, Seoul 153-802, Korea

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received November 25, 2004; revision received April 12, 2004)

ABSTRACT: This paper presents the experimental data for the heat transfer and pressure drop characteristics obtained during the gas cooling process of carbon dioxide in a horizontal tube. The tube in which carbon dioxide flows is made of copper with an inner diameter of 7.73 mm. Experiments were conducted for various mass fluxes and inlet pressures of carbon dioxide. Mass fluxes are controlled at 225, 337 and 450 kg/m²s and inlet pressures are adjusted from 7.5 to 8.8 MPa. The experimental results in this study are compared with the existing correlations for the supercritical heat transfer coefficient, which generally under-predict the measured data. Pressure drop data agree very well with those calculated by the Blasius' equation. Based on the experimental data, a new empirical correlation to estimate the near-critical heat transfer coefficients has been developed.

Key words: Heat transfer(열전달), Pressure drop(압력강하), Carbon dioxide(이산화탄소), Gas cooling(가스냉각), Supercritical region(초임계 영역)

기 호 설 명

C_p : 정압비열 [J/kgK]
 $\overline{C_p}$: 적분평균비열 [J/kgK]
 D : 지름 [mm]
 f : 마찰계수
 G : 질량유속 [kg/m²s]

h : 열전달계수 [kW/m²K]
HTC : 열전달계수 [kW/m²K]
 L : 길이 [mm]
 \dot{m} : 질량유속 [kg/s]
Nu : Nusselt 수, hD/k
Nu' : 일정한 물성치에서 Nusselt 수, hD/k
 P : 압력 [MPa]
Pr : Prandtl 수, $\mu c/k$
 q'' : 열유속 [kW/m²]
Re : Reynolds 수, GD/μ
 T : 온도 [K]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-8362; fax: +82-2-883-0179

E-mail address: minskim@snu.ac.kr

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

b : 평균유체상태

i : 내벽면

in : 관의 입구

out : 관의 출구

pc : 유사임계상태

w : 벽온도에서의 유체상태

wa : 물

1. 서 론

이산화탄소는 환경친화적인 천연냉매이면서 독성과 가연성이 없고 열역학적 성질도 우수하기 때문에 현재 CFC, HCFC 계열 냉매의 대체냉매로 많이 연구되고 있다. 냉동시스템에 이산화탄소를 냉매로 적용하기 위해서는 시스템에 대한 연구와 더불어 열교환기의 최적 설계를 위한 열전달 및 압력강하 특성에 대한 연구가 필요하다.

이산화탄소의 임계온도가 낮기 때문에 이산화탄소를 이용하는 냉동사이클에서 열방출 과정은 대체로 초임계 영역에서 이루어진다. 이와 같은 열방출 과정은 상의 변화를 수반하지 않으며, 냉매의 온도가 하강하면서 진행되는 가스냉각 과정이다. 초임계 가스냉각 과정은 일반적인 응축과정과 다른 특성을 가지며, 가스냉각기의 최적 설계를 위해 열전달 및 압력강하에 대한 정확한 자료가 필요하다.

Krasnoshchekov et al.⁽¹⁾은 이산화탄소의 냉각 조건에 대한 열전달 실험을 지름과 길이가 각각 2.22 mm, 150 mm인 시험부에 대해 수행하였다. 실험 당시의 이산화탄소의 열물성의 측정값이 지금보다는 덜 정확했기 때문에 이 실험에서 제안된 열전달 상관식은 본 실험의 자료보다 낮은 열전달계수를 예측하고 있다. Baskov et al.⁽²⁾는 내경이 4.12 mm이고 두께가 두꺼운 수직관에서 이산화탄소의 열전달계수를 측정하였다. 이 실험에서는 실제보다 낮은 벽면온도가 측정되었으며, 본 실험과 비교하여 낮은 열전달계수가 계산되었

다. Pettersen et al.^(3,4)은 편평한 멀티포트 알루미늄 관에서 냉각 실험을 수행하고 그 결과를 단상 유동에서의 여러 가지 열전달 상관식으로 예측하였다. 그들은 Gnielinski⁽⁵⁾의 상관식이 열전달 효과를 잘 설명한다는 결과를 보였다. Zingerli and Groll⁽⁶⁾은 이산화탄소의 냉각 열전달 및 압력강하 특성에 오일의 영향을 고찰하였다. 그들은 오일의 농도가 높아지면 열전달계수가 작아지고, 약간의 오일의 함유로 인해 압력강하가 커진다는 결과를 보였다. 그들은 실험에서 벽면온도를 직접 측정하지 않았으며 총합 열전달계수를 구해 이산화탄소의 열전달계수를 구하였다. Pitla et al.⁽⁷⁾은 이산화탄소의 유체평균온도와 벽면온도에서 구한 열전달계수를 평균하여 열전달 효과를 계산하는 상관식을 제안하였다.

많은 연구자들이 이산화탄소의 가스냉각 과정에 대한 연구를 수행하였다.^(1-4,6,7) 이 연구들의 결과는 서로 차이를 보이며, 적용에 있어서 제한을 가지고 있다. 본 연구에서는 실험을 통해 열전달 및 압력강하 특성에 대한 자료를 얻고 적절한 형태의 상관식을 개발하여 실제 냉동시스템을 설계하는 데 이용할 수 있도록 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 가스냉각 실험장치

실험장치의 개략적인 형태를 Fig.1에 나타내었다. 실험장치는 냉매 순환부, 예열을 위한 온수 순환부, 시험부에 연결된 냉각수 순환부, 냉매의 과냉 조절을 위한 에틸렌 글리콜 순환부로 이루어져 있다. 냉매를 순환시키기 위해 마그네틱 기어 펌프를 사용하였고, 냉매의 유량을 질량유량계로 측정하였다. 질량유량계를 지난 액상의 냉매는 전기로 가열되는 예열기와 온수에 의해 가열되는 2차 예열기를 지나 시험부로 들어간다. 예열기를 통해 입구 온도조건을 조절할 수 있으며 시험부 입구에 초임계 상태로 들어온 냉매는 2차 유체인 물과 열교환하며 가스냉각 과정을 거친 후 수액기로 들어간다. 수액기를 지난 냉매는 과냉기에서 냉각되어 과냉 상태의 액상으로 다시 펌프로 유입된다. 펌프를 거치기 전의 시린지 펌프(syringe pump)에서는 시스템 전체의 냉매량을 제어하여 시험부의 입구 압력을 정밀하게 조절하였다.

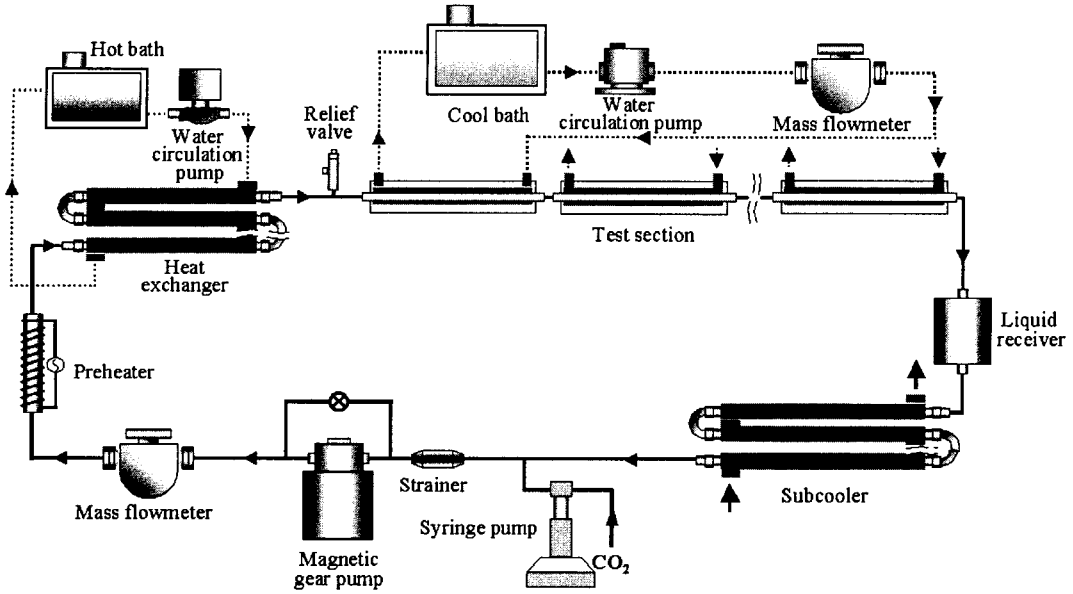


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

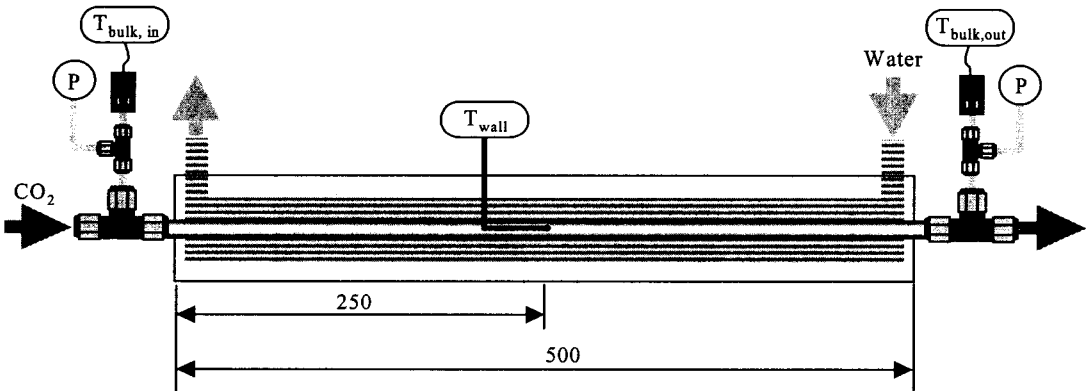


Fig. 2 Schematic diagram of one unit of the test section.

가스냉각 시험부는 8개의 소시험부로 이루어져 있고 Fig. 2에 소시험부의 개략도를 나타내었다. 소시험부는 외경 9.5 mm, 두께 0.90 mm인 동관을 내관으로 하였고, 환상공간은 아크릴을 가공해 제작하였고 지름 16 mm, 길이 470 mm이다. 각각의 소시험부 사이에서 T형 열전대를 이용해 냉매의 온도를 측정하였고 같은 위치에서 압력을 측정하였다. 소시험부의 외벽면 온도는 T형 열전대를 이용하여 직접 측정하였다. 냉매가 방출한 열량을 계산하기 위해 2차 유체인 물의 입출구 온도를 열전대를 이용해 측정하였다. 압력은 시험부 입구에서 절대압력을 측정하고 차압계를 이용하

여 각 측정점에서의 차압을 측정하였다.

2.2 실험자료의 처리 및 오차분석

각각의 소시험부의 국소 열전달계수는 식(1)과 같이 계산하였다.

$$h = \frac{q''}{T_b - T_{wi}} \quad (1)$$

여기서 T_b 는 이산화탄소의 평균유체온도이며, 소시험부 사이마다 측정된 냉매온도를 산술 평균하

Table 1 Test conditions of heat transfer experiment

Parameter	Value
Mass flux of CO ₂ (kg/m ² s)	225, 337, 450
Test section average pressure (MPa)	7.5, 7.7, 8.0, 8.2, 8.5, 8.8
Inlet temperature of CO ₂ (°C)	50~80
Mass flow rate of secondary fluid (g/s)	60~120
Inlet temperature of secondary fluid (°C)	7~12

여 계산하였다. 내벽면 온도 T_{wi} 는 측정된 외벽면 온도를 증공원통에 사용되는 일차원 열전도식을 이용하여 계산하였다. 열유속은 2차 유체인 물의 온도와 유량을 측정하여 식(2)과 같이 계산하였다.

$$q'' = \frac{\dot{m}_{wa} C_{p,wa} (T_{wa,out} - T_{wa,in})}{\pi D_i L} \quad (2)$$

시험부에서 이산화탄소가 방출한 열량과 물이 얻은 열량 사이에 에너지 균형 실험을 수행하였고, 평균오차가 1.3% 이내인 결과를 얻었다. 측정 오차를 평가하기 위해 오차해석을 수행하였다. 전체 실험오차는 편향오차(bias error)와 우연오차(precision error)로 크게 나뉘며, 열전달계수의 전체 측정오차는 10.6%이다.

2.3 실험조건 및 방법

이산화탄소의 가스냉각 실험은 냉매의 질량유

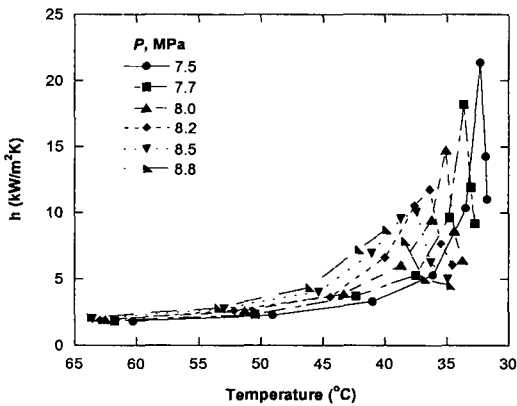


Fig. 3 Heat transfer coefficients versus bulk temperature distribution along the test section for different inlet pressures ($G=337 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

속과 입구압력을 변화시키면서 수행하였다. 냉매의 질량유속은 225, 337, 450 kg/m²s로 변화시키고 압력은 7.5, 7.7, 8.0, 8.2, 8.5, 8.8 MPa로 변화시키면서 실험하였다. Table 1에 본 실험의 실험 조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 이산화탄소의 열전달 특성

동일한 질량유속에 대하여 시험부 압력을 변화시키면서 수행한 실험의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이산화탄소의 온도가 높은 가스냉각 초기에는 압력의 변화에 따른 열물성의 차이가 적다. 따라서 이 영역에서는 압력에 따른 열전달계수의 차이가 거의 나타나지 않는다. 가스냉각이 진행되어 이산화탄소의 온도가 임계온도 부근이 되면 압력에 따라 비열을 포함한 이산화탄소의 열물성의 차이가 커지고 이로 인해 열전달계수의 차이

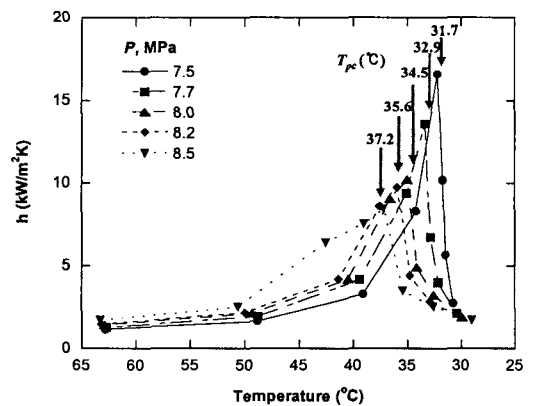


Fig. 4 Comparison of the pseudocritical temperature and the temperature at maximum value of the heat transfer coefficient for each pressure ($G=225 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

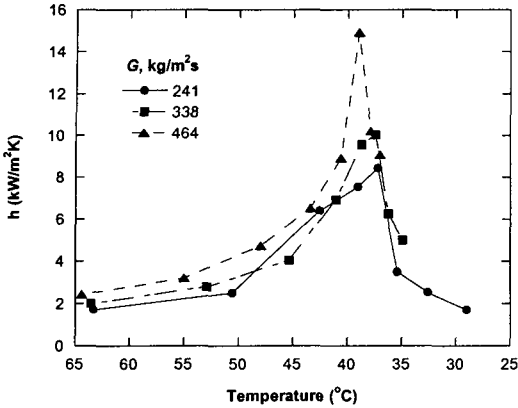


Fig. 5 Heat transfer coefficients versus bulk temperature distribution along the test section for different mass fluxes ($P=8.5$ MPa).

가 나타난다.

이산화탄소의 초임계 영역에서 각각의 압력에 대해 비열이 최대가 되는 유사임계온도(pseudo-critical temperature)가 존재하고 이 온도는 압력에 대해 거의 선형적으로 증가한다. Fig. 4에는 압력에 대해 최대 열전달계수가 나타나는 온도가 유사임계온도와 상당히 일치하는 결과를 나타내었다. 즉, 비열값이 커짐으로 인해 이산화탄소의 온도변화는 둔화되고, 이에 따라 마치 유사 상변화 과정처럼 거동하여 결과적으로 열전달계수가 크게 측정된다.

일정한 작동압력에 대해 질량유속의 변화에 따른 열전달계수의 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다. 질량유속이 증가하면 Reynolds 수가 증가하고, 일반적으로 열전달 효과가 향상되는 것으로 알려져 있다. 이산화탄소를 작동유체로 수행한 본 실험의 경우에도 질량유속이 증가함에 따라 열전달계수가 전반적으로 증가하였다.

3.2 초임계 영역에서의 압력강하 특성

실험에서 측정된 압력강하량은 모든 시험 범위에 대하여 1 kPa/m를 넘지 않았다. Fig. 6에 수평 평활관에서 측정된 이산화탄소의 압력강하 실험결과를 나타내었다. 이산화탄소의 질량유속이 크고 실험압력이 작을수록 압력강하량은 증가한다. 시스템 압력이 커짐에 따라 유체의 밀도가 커지

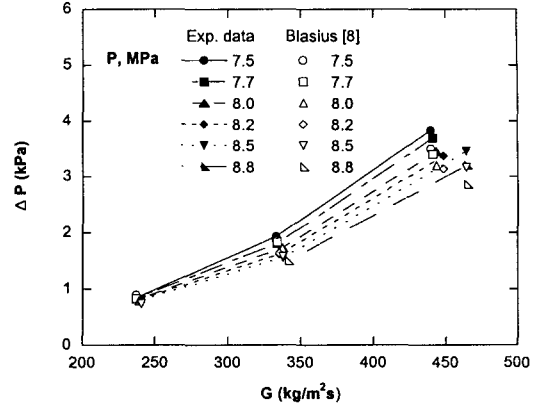


Fig. 6 Comparison of the measured pressure drop data with those predicted by Blasius' equation.

기 때문에 압력강하량은 작아진다. 시스템 압력이 작을수록 질량유속에 따라 압력강하량이 더 크게 증가하는 경향을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

초임계 영역에서 이산화탄소의 유동은 단상유동 형태와 비슷하기 때문에 실험에서 측정된 압력강하 자료를 단상유동에 많이 쓰이는 압력강하 상관식으로 예측하는 것이 합리적이다. 평활관에서 완전 발달된 난류 단상유동의 압력강하 식은 식(3)과 같다.

$$\Delta P = f \frac{G^2 L}{2\rho D_i} \quad (3)$$

식(3)의 마찰계수 f 는 Blasius 관계식⁽⁸⁾을 이용하여 예측하였으며, 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 측정값과 예측값의 절대평균오차는 4.9%이며, Blasius 관계식⁽⁸⁾은 이산화탄소의 가스냉각 과정의 압력강하량을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

4. 새로운 상관식의 개발

4.1 실험자료와 기존 상관식과의 비교

실험 결과를 Krasnoshchekov and Protopopov⁽¹⁾의 상관식, Baskov et al.⁽²⁾의 상관식, Petrov and Popov⁽⁹⁾의 상관식, 그리고 Pitla et al.⁽⁷⁾의 상관식의 예측값과 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

이 상관식들은 초임계 영역에서의 냉각 열전달계수를 예측하기 위해 개발된 상관식들이다. Pitla et al.⁽⁷⁾의 상관식의 예측값을 제외하고는 가스냉각 과정 동안 비슷한 열전달계수의 경향을 보인다. 그러나 기존 네 상관식들의 예측값은 실험의 측정값에 비해 전반적으로 낮았으며, 임계온도 부근에서는 그 차이가 더 크게 나타났다.

Pitla et al.⁽⁷⁾의 상관식은 다른 연구자들과 다른 온도에서 최대 열전달 효과가 나타난다고 예측했다. 이것은 그들이 열전달계수를 계산할 때, 이산화탄소의 유체평균온도와 벽면에서의 온도를 기준으로 구한 열전달계수를 단순평균했기 때문으로 판단된다. 실제로 초임계 영역에서의 이산화탄소의 열전달 효과는 유체평균온도와 이산화탄소의 벽면온도에서 구한 열전달계수의 산술평균이 아니다. Petrov and Popov⁽⁹⁾의 상관식은 본 실험에서 계측한 값보다 낮게 예측하였다. 이 상관식은 수치적으로 얻어졌기 때문에 실험에서 구한 자료와 경향은 비슷하나 값의 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. Baskov et al.⁽²⁾의 상관식은 본 실험자료를 유사하게 예측하지만, 제한된 압력범위에서만 사용할 수 있기 때문에 보완이 필요하다. Baskov et al.⁽²⁾의 상관식의 기본 형태인 Krasnoshchekov et al.⁽¹⁾의 상관식 역시 실험자료의 경향을 잘 예측하였다. 기존 상관식들을 고찰해 볼 때 초임계 영역에서의 이산화탄소의 가스

냉각 과정의 열전달 현상을 설명하기 위해서는 유체평균온도와 벽면온도의 밀도와 비열이 중요하다.

4.2 새로운 상관식의 개발

기존 상관식들은^(1,2,7,9) 실험에서 측정된 가스냉각 열전달계수와 비교하여 전반적으로 낮은 값을 예측하였다. 본 연구에서 측정된 실험자료를 바탕으로 Baskov et al.⁽²⁾이 개발한 상관식의 형태를 발전시켜 초임계 상태 가스냉각 과정에서의 이산화탄소 열전달에 관한 새로운 상관식을 개발하였다.

$$Nu_w = 1.38Nu_w' \left(\frac{\bar{C}_p}{C_{pw}} \right)^{0.86} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.57} \quad (4)$$

식(4)의 상관식은 임계온도 부근에서의 온도에 따른 열물성의 큰 차이를 설명하기 위해 유체의 벽면온도와 유체평균온도 사이의 비열차이와 밀도차이를 고려하고 있다. 제안된 상관식의 예측값과 실험에서 측정된 열전달계수의 비교를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7에 식(4)의 상관식으로 예측한 값을 함께 나타내었다. 상관식은 대부분의 실험자료를 20% 이내에서 예측하였고, 절대평균 오차는 12.3%였다.

식(4)의 상관식을 이용하기 위해서는 열교환기

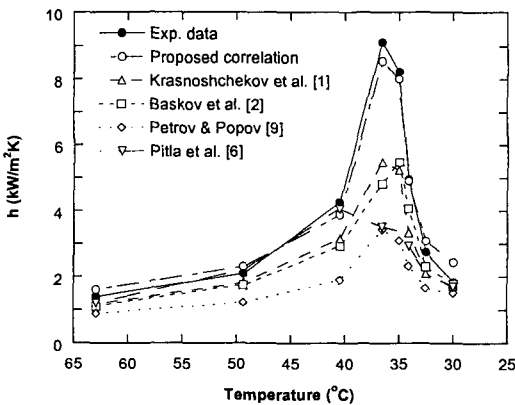


Fig. 7 Comparison of experimental data with the calculated heat transfer coefficients using the existing correlations as a function of carbon dioxide temperature ($G=239 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $P=8.0 \text{ MPa}$).

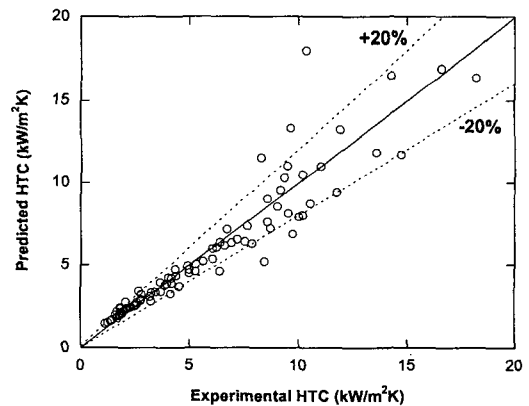


Fig. 8 Comparison of the measured heat transfer coefficients with those predicted by modified Baskov correlation.

내의 이산화탄소의 벽면 부근 온도를 알아야 한다. 실제 가스냉각기의 설계에 있어서 이산화탄소의 벽면온도를 측정할 수 없기 때문에 벽면온도가 주어지지 않는 경우에도 열전달계수를 예측할 수 있는 식(5)을 제안하였다.

$$Nu_b = aRe_b^b Pr_b^c \left(\frac{\rho_{pc}}{\rho_b} \right)^n \quad (5)$$

$$a=0.14, b=0.69, c=0.66, \\ n=0 \text{ for } T_b > T_{pc}$$

$$a=0.013, b=1.0, c=-0.05, \\ n=1.6 \text{ for } T_b < T_{pc}$$

이 상관식은 유사임계온도를 기준으로 형태가 다른 두 개의 식을 갖는다. 임계온도 부근의 열전달 효과를 설명하기 위해 다양한 열물성의 조합을 고려한 후 상관식의 형태를 결정하였다. 유용한 상관식인 식(5)는 절대평균오차 12.7%로 실험자료를 예측하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 가스냉각 과정에서의 이산화탄소의 열전달 특징과 압력강하 특성을 실험적으로 고찰하였다.

(1) 가스냉각 과정이 진행됨에 따라 비열이 임계온도 부근에서 크게 증가하다가 감소하기 때문에 열전달계수가 증가하다가 감소하였다. 열전달계수가 최대가 되는 온도는 비열이 최대가 되는 유사임계온도와 거의 일치하였다. 압력이 증가함에 따라 유사임계온도에서의 열전달계수의 최대값은 작아지는 결과를 보였다. 또한 질량유속이 증가함에 따라 열전달 효과는 모든 압력에 대해 향상되었다.

(2) 측정된 압력강하량은 모든 실험조건에 대해서 1 kPa/m를 넘지 않았다. 압력강하는 시스템 압력이 낮고 질량유속이 클수록 크게 나타났고 Blasius 관계식⁽⁸⁾을 이용해 비교하였다. 측정값과 예측값의 절대평균오차는 4.9%이며, Blasius 관계식⁽⁸⁾은 이산화탄소의 가스냉각 과정의 압력강하량을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

(3) 본 실험에서 측정된 가스냉각 열전달계수를 임계온도 부근에서의 열전달 특성을 설명하는 기

준 열전달 상관식의 예측값과 비교하였다. Krasnoshchekov et al.,⁽¹⁾ Baskov et al.,⁽²⁾ Petrov and Popov,⁽⁹⁾ Pitla et al.⁽⁷⁾ 상관식은 모두 실험자료에 비해 낮은 값을 예측하였으며, 각각 RMS 오차가 29.7%, 29.6%, 47.9%, 38.0%였다. 본 연구에서는 Baskov et al.⁽²⁾이 개발한 상관식을 발전시켜 가스냉각 과정에서의 이산화탄소 열전달에 관한 새로운 상관식을 제시하였다.

후 기

본 연구는 서울대학교 마이크로열시스템 연구센터의 지원 및 산업자원부의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

1. Krasnoshchekov, E. A., Kuraeva, I. V. and Protopopov, V. S., 1970, Local heat transfer of carbon dioxide at supercritical pressure under cooling conditions, High temperature (Translated from Teplofizika Vysokikh Temperatur), Vol. 7, No. 5, pp. 856-862.
2. Baskov, V. L., Kuraeva, I. V. and Protopopov, V. S., 1977, Heat transfer with the turbulent flow of a liquid at supercritical pressure in tubes under cooling conditions, High temperature (Translated from Teplofizika Vysokikh Temperatur), Vol. 15, No. 1, pp. 81-86.
3. Pettersen, J., Rieberer, R. and Leister, A., 2000, Heat transfer and pressure drop characteristics of supercritical carbon dioxide in microchannel tubes under cooling, IIF-IIR Commissions B1, B2, E1, and E2, pp. 99-106.
4. Pettersen, J., Rieberer, R. and Munkejord, S. T., 2000, Heat transfer and pressure drop characteristics of evaporating carbon dioxide in microchannel tubes, IIF-IIR Commissions B1, B2, E1, and E2, pp. 107-114.
5. 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.

6. Zingerli, A. and Groll, E. A., 2000, Influence of refrigeration oil on the heat transfer and pressure drop of supercritical CO₂ during in-tube cooling, IIF-IIR Commissions B1, B2, E1, and E2, pp.269-278.
7. Pitla, S. S., Groll, E. A. and Ramadhyani, S., 2000, New correlation for the heat transfer coefficient during in-tube cooling of turbulent supercritical carbon dioxide, IIF-IIR Commissions B1, B2, E1, and E2, pp.259-267.
8. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, Introduction to Heat Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons.
9. Petrov, N. E. and Popov, V. N., 1985, Heat transfer and resistance of carbon dioxide being cooled in the supercritical region, Thermal Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 131-134.