

임계점 부근에서 이산화탄소의 증발열전달 및 압력강하 특성 연구와 상관식 개발

윤 석 호, 조 은 석*, 김 민 수**

LG전자 디지털 어플라이언스 연구소, *서울대학교 기계항공공학부

Characteristics of Evaporative Heat Transfer and Pressure Drop of Carbon Dioxide and Correlation Development near the Critical Point

Seok Ho Yoon, Eun Seok Cho*, Min Soo Kim**

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

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received November 25, 2003; revision received April 12, 2004)

ABSTRACT: In recent years, carbon dioxide among natural refrigerants has gained considerable attention as an alternative refrigerant due to its excellent thermophysical properties. However, few investigations have been performed to develop useful correlations of heat transfer coefficients and pressure drop during evaporation of carbon dioxide. This study is aiming at providing the characteristics of heat transfer and pressure drop during the evaporation process of carbon dioxide. Heat is provided by a direct heating method to the test section, which was made of a seamless stainless steel tube with an inner diameter of 7.53 mm, and a length of 5.0 m. Experiments were conducted at saturation temperatures of -4 to 20°C , heat fluxes of 12 to 20 kW/m^2 and mass fluxes of 200 to $530\text{ kg/m}^2\text{s}$. A comparison of different heat transfer correlations applicable to evaporation of carbon dioxide has been made. Based on the experiments for evaporation heat transfer and pressure drop, new correlations were developed. The newly developed empirical correlations for the heat transfer and pressure drop show average absolute deviations of 15.3% and 16.2%, respectively.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Evaporative heat transfer coefficient(증발열전달계수), Pressure drop(압력강하), Correlation(상관식)

기 호 설 명

Bd : Bond 수, $g(\rho_l - \rho_v)D_i/\sigma$

Bo : Boiling 수, $q/(gi_{fg})$

D_i : 관 내경 [m]

E : 향상계수(enhancement factor)

g : 중력가속도 [m/s^2]

G : 질량유속 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

h : 열전달계수 [$\text{W/m}^2\text{K}$]

i_{fg} : 증발엔탈피 [kJ/kg]

k : 열전도도 [W/mK]

M : 분자량 [kg/kmol]

† Corresponding author

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

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

- P : 압력 [Pa]
- P^* : 환산압력(reduced pressure)
- Pr : Prandtl 수, $\mu c_p/k$
- q'' : 열유속 [kW/m^2]
- Re : Reynolds 수, UL/ν
- S : 억제계수(suppression factor)
- T : 온도 [K]
- U : 속도 [m/s]
- x : 건도
- X : Martinelli 파라미터,
 $\{(1-x)/x\}^{0.9}(\rho_g/\rho_l)^{0.5}(\mu_l/\mu_g)^{0.1}$
- We_D : Weber 수, $\rho_l U^2 D_i/\sigma$

그리스 문자

- θ_{dry} : 드라이 앵글(dry angle)
- ψ^2 : 2상유동계수(two phase multiplier)
- Γ^2 : 물성계수(property index)
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

- cr, b : 관 하부(bottom)에서 임계건도
- cr, t : 관 상부(top)에서의 임계건도
- f : 마찰항
- g : 기상(gas phase)
- l : 액상(liquid phase)
- lo : 유동 전체가 액상
- nb : 핵비등(nucleate boiling)
- sat : 포화상태
- tp : 2상상태(two phase)
- wet : 액막이 존재하는 영역(wetted portion)
- wi : 관 내측

1. 서 론

최근 오존층 파괴 및 지구 온난화 문제 등 환경문제가 새롭게 대두되면서, 냉매로서의 이산화탄소(R744)에 대한 연구들이 새롭게 이루어지고

있다. 이산화탄소는 기존의 냉매에 비해 대단히 낮은 오존층 파괴지수(ODP) 및 지구 온난화계수(GWP) 및 우수한 열역학적 물성으로 인하여 대체냉매로서 각광받고 있다. 특히 독성이 없고 가연성이 없으며 냉매의 단위체적당 용량(volumetric capacity of refrigeration, VCR)이 커서 시스템의 소형화가 가능한 장점이 있다.^(1,2) 그러나 이산화탄소를 냉매로 적용하기 위한 많은 연구들은 열역학적 사이클 해석에 중점을 두고 있어 상대적으로 이산화탄소의 열전달계수 및 압력강하에 대한 특성과 이에 대한 상관식에 대한 연구는 적은 실정이다. Bredesen et al.⁽³⁾은 간접가열방식을 사용하여 이산화탄소의 증발과정에서의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구를 수행한 바 있었으나 간접가열방식을 사용하여 일정 열유속조건을 구현하기 어려웠으며, 열유속의 범위가 제한되어 있었다. Hwang et al.⁽⁴⁾은 Bredesen et al.⁽³⁾의 실험결과를 인용하여 Bennet-Chen의 상관식에서 제시된 계수들을 수정하여 제시하였다. Hihara and Tanaka⁽⁵⁾는 내경이 1 mm인 수평관에서 포화온도 15°C인 경우 증발열전달계수 및 압력강하를 측정하였다. 그러나 이산화탄소 임계점 부근의 증발과정에서 나타나는 부분적 드라이 아웃 조건을 고려한 열전달 및 압력강하에 관한 상관식은 아직 거의 없는 실정이다.

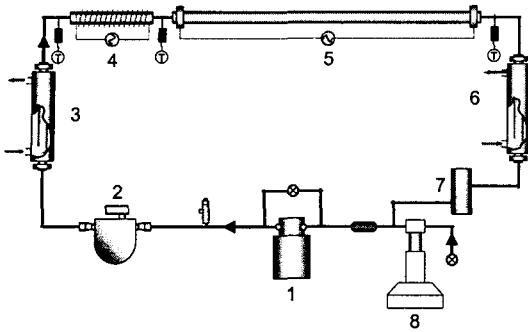
본 연구에서는 증발과정에서 나타나는 이산화탄소의 열전달 특성 및 압력강하 특성에 대하여 실험적 연구를 수행하고, 그 결과를 이에 대한 상관식을 개발하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구를 수행하기 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 시험부(test section) 앞에 과냉기(subcooler)와 예열기(pre-heater)를 설치하여 시험부 입구 건도를 조절할 수 있도록 설계하였다. 시린지 펌프(syringe pump)는 적절한 냉매 충전량을 조절할 수 있도록 펌프 앞에 설치되었다.

시험부는 내경 7.73 mm, 두께 0.90 mm인 이음새 없는 5.0 m의 스테인레스 스틸 원관(seamless stainless steel tube)을 사용하였으며, 일정 열유속 조건을 구현하기 위하여 직접가열방식(direct



- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1. Magnetic gear pump | 5. Test section |
| 2. Mass flowmeter | 6. Heat exchanger |
| 3. Subcooler | 7. Liquid receiver |
| 4. Preheater | 8. Syringe pump |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

heating method)을 택하였다. 시험부에는 1 m 간격으로 압력탭을 설치하여 각 지점의 압력을 측정하였다. 벽면온도를 측정하기 위하여 50 cm 간격으로 10곳의 상, 하, 좌, 우, 네 위치에 T형 열전대를 부착하였다. 열전대의 끝은 탄소봉 용접을 하였고, 이렇게 측정된 온도로부터 1차원 열전도방정식을 통해 내벽면온도를 구하였다. 시험부는 고압용 절연피팅(dielectric fitting)을 사용하여 시스템과 절연시켰다.

2.2 실험자료 처리 및 실험범위

이산화탄소의 증발열전달계수는 식(1)을 이용하여 구하였다.

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

특정지점에서의 온도는 식(2)를 통하여 해당 건도에서의 값을 구하고, 이를 이용하여 국소열전달계수를 계산한다. 하첨자 k 는 시험부의 윗면, 아랫면, 좌측면, 우측면을 나타낸다.

$$T_{wi} = \frac{1}{4} \sum_k T_k \quad (2)$$

냉매의 포화온도는 시험부의 포화압력을 측정 한 후, 물성계산 프로그램인 REFPROP⁽⁶⁾을 이용

하여 계산하였다.

본 연구는 열유속 12.3~18.9 kW/m², 질량유속 212~530 kg/m²s의 범위 내에서 실험을 수행하였으며, 포화온도 범위는 -4~20℃이다.

3. 이산화탄소의 증발열전달 상관식 개발

3.1 임계건도

관 상부의 벽면온도가 특정 지점 이후에 급격히 증가함을 보이는 것이 본 실험에서 관찰되었다. 이에 따라 특정 건도 이후에 이산화탄소의 증발열전달계수는 감소하는 경향을 나타낸다. 이를 R22와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. R22는 건도 증가에 따라 열전달계수가 증가하거나 비슷한 경향을 보이는 데 반하여 이산화탄소는 저건도 지역에서 약간의 증가를 보이다가 특정 건도 이후에서 감소하게 된다. 이러한 경향은 임계온도 부근에서 간접가열 실험을 수행한 Bredesen et al.⁽³⁾에 의해 이미 알려진 바 있다.

이는 관 상부의 액막이 냉매의 증발과정에서 점차 얇아지다가 결국 액막이 관 상부에서 부분적으로 먼저 파괴되어 시험부 내벽면온도를 급격히 증가시키는 것으로 판단된다. 액막이 파괴된 이후에는 기체가 관 내벽면에 직접 닿아 열전달 특성이 현저히 떨어지게 된다. 이러한 현상은 탄화수소 계열의 냉매에서 건도 0.9 이상에서 Kattan et al.⁽⁷⁾이 관찰한 바 있다. 이산화탄소는 기존의 냉매들에 비해 점성계수와 표면장력이 매우 낮아

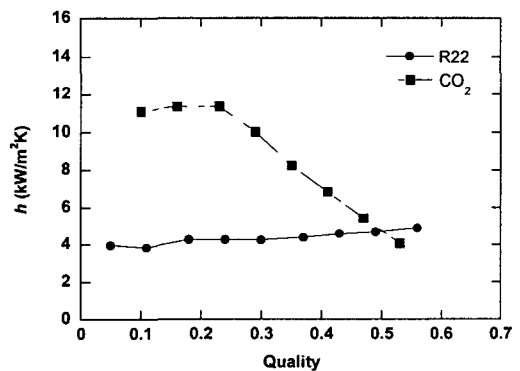


Fig. 2 Comparison of heat transfer coefficients between R22 and carbon dioxide ($T_{sat} = 5.0^\circ\text{C}$, $G = 318 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q'' = 16.4 \text{ kW/m}^2$).

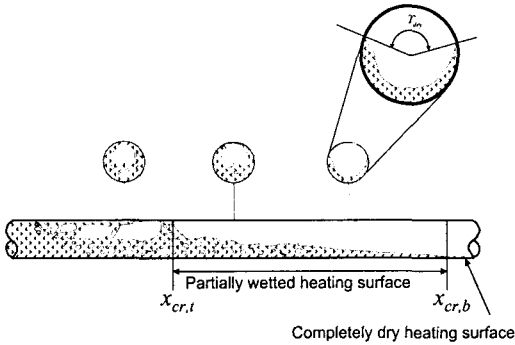


Fig. 3 Prediction of flow pattern of carbon dioxide during flow boiling.

중력에 의한 관 상부의 부분적인 액막 파괴가 저 건도 지역에서도 일어날 수 있게 된다.

액막이 파괴되는 지점의 건도를 Kefer et al.⁽⁸⁾ 은 임계건도(critical quality)로 정의하였다. 낮은 점성과 표면장력을 갖는 이산화탄소의 경우 관 상부 지점에서의 드라이 아웃 현상은 열전달계수의 특성을 이해하고 해석하는 데 있어 반드시 고려되어야 할 중요한 요소라 할 수 있다. Fig. 3 에는 이산화탄소의 증발열전달 과정에서 예상되는 유동양식을 나타내었다. $x_{cr,t}$ 는 부분적인 드라이 아웃이 시작되는 지점의 임계건도이며 $x_{cr,b}$ 까지 하부의 액막은 유지되며 그 이후에는 전체적인 드라이 아웃이 일어나게 된다.

Fig. 4에서 다양한 열유속 조건하에서 특정 건도 이후의 영역에서 열전달계수가 감소하는 이산화탄소의 증발열전달 특성이 임계건도의 전후에서 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

실험에서 조절하는 변수인 질량유속, 열유속, 포화온도는 관 상부에서의 임계건도를 결정하는 중요한 요소이다. 상관식 개발에는 Reynolds 수, boiling 수, Bond 수가 사용되었으며 Reynolds 수는 질량유속, boiling 수는 열유속, Bond 수는 표면장력을 각각 반영하고 있다. 일반적으로 냉매의 포화온도는 밀도, 점성 및 표면장력에 강한 영향을 미친다. 따라서 실험결과를 기반으로 각 무차원 수를 커브 피팅(curve-fitting)하여 임계건도(critical quality)를 식(3)에 나타내었다.

$$x_{cr,t} = 0.0012 Re_b^{2.79} (1000 Bo)^{0.06} Bd^{-4.76} \quad (3)$$

Fig. 5는 내벽면 온도와 관 상부에서의 예상 임계건도(predicted critical quality)를 나타내고 있다. 관 상부에서 액막이 파괴되기 시작하는 임계건도를 지난 이후 관 상부의 벽면온도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 이산화탄소의 증발열전달 상관식을 개발함에 있어 임계건도를 기점으로 달라지는 열전달 특성을 반영하기 위하여 임계건도 전, 후의 열전달 특성을 나타내는 각각의 상관식이 개발될 필요가 있으며, 본 연구에서

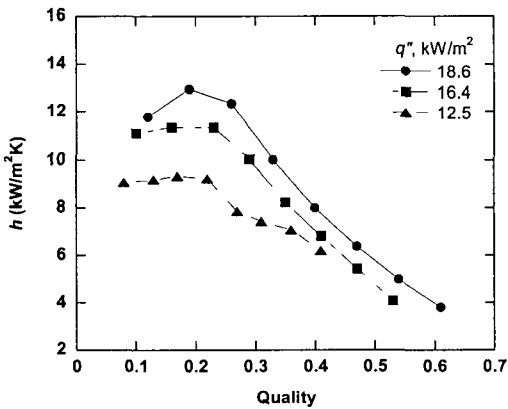


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficients with respect to quality ($T_{sat}=5.0^{\circ}C$, $G=318 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

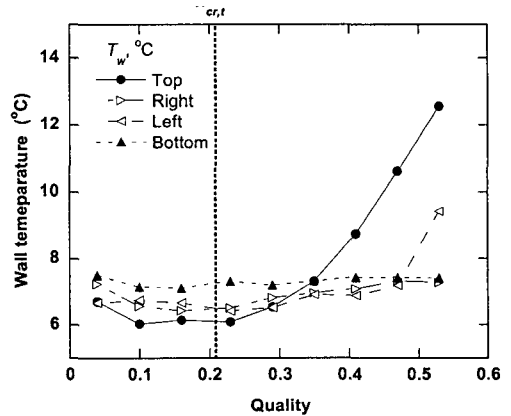


Fig. 5 Comparison of prediction of critical quality with inner wall temperature of test section upper side ($T_{sat}=5.0^{\circ}C$, $G=318 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q''=16.4 \text{ kW/m}^2$).

연은 실험값을 바탕으로 상관식을 개발하였다.

3.2 임계건도 이전의 열전달상관식

임계건도 이전 영역의 상관식 개발에 있어서는 기존 상관식이 나타내는 열전달 특성과 이산화탄소의 증발열전달 특성이 같을 것으로 판단된다. 그러나 이산화탄소는 임계온도가 낮아 증발온도 범위에서 기존의 상관식을 그대로 사용할 수는 없다. 본 연구에서는 임계건도 이전의 저건도 영역에 대하여서는 Liu and Winterton⁽⁹⁾의 상관식을 모델로 하여 이산화탄소에 대한 본 연구의 실험결과를 기반으로 실험값과 상관식에서의 예측값의 편차가 최소가 되도록 계수들을 피팅하였다. $x < x_{cr,t}$ 의 영역에서 사용될 상관식을 식(4)에 나타내었다.

$$h_{tp} = [(S \cdot h_{nb})^2 + (E \cdot h_i)^2]^{1/2} \quad (4a)$$

$$h_{nb} = 55P^{*0.12} (-\log P^*)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (4b)$$

$$h_i = 0.023 \text{Re}_l^{0.8} \text{Pr}_l^{0.4} \frac{k_l}{D_i} \quad (4c)$$

$$S = \frac{1}{1 + 1.62 \times 10^{-6} E^{0.69} \text{Re}_l^{1.11}} \quad (4d)$$

$$E = \left[1 + 9.36 \times 10^3 \text{Pr}_l \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{0.11} \quad (4e)$$

3.3 임계건도 이후의 열전달상관식

Kattan et al.⁽¹⁰⁾은 탄화수소계열의 냉매에서 임계건도 이후 관 상부의 기체상태의 냉매가 직접 접촉하는 부분은 단상유동의 열전달 특성이 지배적이며, 액막이 깨지지 않은 관 하부에서는 2상유동의 열전달 특성이 지배적임을 보인 바 있다.

본 연구에서는 이산화탄소의 증발과정이 일어나는 시험부의 단면에 대하여 액막이 존재하는 부분(wet portion)과 상부의 액막이 깨져 직접 기상이 접촉하는 부분(dry portion)을 함께 고려하여 식(5)와 같은 형태의 상관식을 개발하였다.

$$h_{tp} = \frac{\theta_{dry} h_g + (2\pi - \theta_{dry}) h_{wet}}{2\pi} \quad (5)$$

여기서 h_g 는 기상의 열전달계수로 Dittus-Boelter⁽¹¹⁾의 상관식을 이용하여 구하였으며, Gungor and Winterton⁽¹²⁾의 상관식을 이용하여 액막이 존재하는 부분의 열전달계수 h_{wet} 을 계산하였다. Kattan et al.⁽¹⁰⁾은 액막이 파괴된 부분을 나타내는 θ_{dry} 를 사용한 새로운 유동선도와 상관식을 제안한 바 있다. 그러나 이산화탄소는 Kattan et al.의 작동유체에 포함되어 있지 않으므로, 이산화탄소에 적용할 수 있는 θ_{dry} 에 대한 상관식이 요구된다. 식(6)에 $x \geq x_{cr,t}$ 인 경우에 θ_{dry} 를 결정하는 상관식을 나타내었다. 건도가 증가함에 따라 기상과 접촉면적이 커지는 것을 반영하기 위해 Martinelli 파라미터를 포함시켰다.

$$\frac{\theta_{dry}}{2\pi} = 36.23 \text{Re}^{3.47} \text{Bo}^{4.84} \text{Bd}^{-0.27} \left(\frac{1}{X} \right)^{2.6} \quad (6a)$$

$$h_g = 0.023 \text{Re}_g^{0.8} \text{Pr}_g^{0.4} \frac{k_g}{D_i} \quad (6b)$$

$$E = 1 + 3000 \text{Bo}^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.41} \quad (6c)$$

3.4 실험결과와 상관식의 비교

기존의 열전달상관식들인 Gungor and Winterton,⁽¹²⁾ Jung et al.,⁽¹³⁾ Liu and Winterton,⁽⁹⁾ Kandlikar,⁽¹⁴⁾ Modified Bennet-Chen⁽⁴⁾의 상관식에서 예측한 증발열전달계수값과 본 연구에서의 측정값의 평균편차(average deviation), 절대평균편차(absolute average deviation), RMS 편차(root mean squared deviation)를 Table 1에 나타내었다. Jung et al.,⁽¹³⁾ Liu and Winterton⁽⁹⁾의 상관식은 측정값보다 큰 값을, Gungor and Winterton,⁽¹²⁾ Kandlikar,⁽¹⁴⁾ Modified Bennet-Chen⁽⁴⁾의 상관식은 측정값보다 작은 값을 보여주는 경향을 나타내었다.

본 연구에서 개발된 상관식에서의 예측값을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 임계건도 이전의 영역에서는 열전달계수가 증가하다가 임계건도 이후의 영역에서는 이산화탄소의 증발열전달계수가 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

본 상관식에서 예측한 값과 전체 실험자료값을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 상관식과 실험값의

Table 1 The deviations between existing correlations and experimental data

Correlations	err^* (%)	abs^{**} (%)	rms^{***} (%)
Gungor and Winterton(1987) ⁽¹²⁾	-21.2	34.8	38.9
Jung et al.(1989) ⁽¹³⁾	0.4	37.1	48.3
Liu and Winterton(1989) ⁽⁹⁾	22.7	44.7	76.1
Kandlikar(1990) ⁽¹⁴⁾	-33.9	39.9	43.1
Modified Bennet-Chen(1997) ⁽⁴⁾	-24.7	48.5	58.7

$$err^* = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{h_{exp} - h_{cal}}{h_{exp}} \right) \times 100, \quad abs^{**} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{h_{exp} - h_{cal}}{h_{exp}} \right| \times 100, \quad rms^{***} = \sqrt{\left\{ \frac{1}{N} \sum \left(\frac{h_{exp} - h_{cal}}{h_{exp}} \right)^2 \right\}} \times 100$$

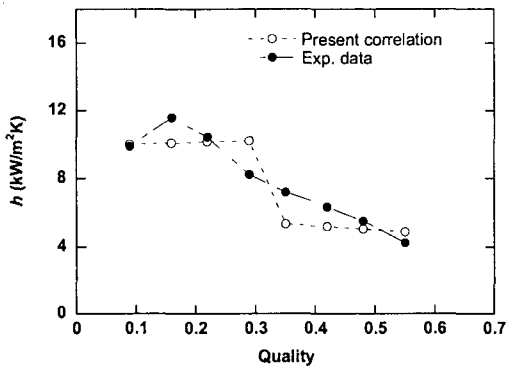


Fig. 6 Comparison of predictions of the present correlation and experimental heat transfer coefficients ($T_{sat}=5.0^\circ\text{C}$, $G=318 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q''=16.4 \text{ kW/m}^2$).

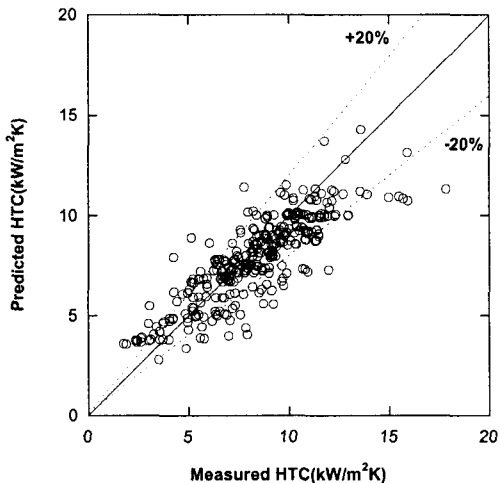


Fig. 7 Comparison between predicted by new correlation of this study and experimental heat transfer coefficients.

평균편차(average deviation), 절대평균편차(absolute average deviation), RMS 편차(root mean squared deviation)는 각각 1.5%, 15.2%, 21.1%로 나타났다.

4. 이산화탄소의 압력강하 상관식

수평관에서의 2상유동 압력강하에 관한 기존의 Chisholm's B-coefficient,⁽¹⁵⁾ C-coefficient,⁽¹⁵⁾ Jung and Radermacher⁽¹⁶⁾의 상관식을 본 연구에서의 실험결과와 비교한 결과 각각 87%, 125.9%, 128.9%의 절대평균편차(absolute average deviation)를 나타내었다. 이산화탄소의 2상유동 압력강하에 대한 상관식을 개발하기 위하여 실험결과와 편차가

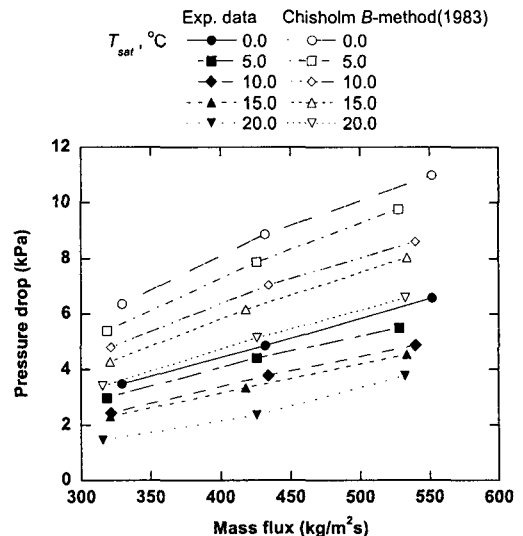


Fig. 8 Comparison of experimental data with Chisholm B-method pressure drop correlation ($q''=16.4 \text{ kW/m}^2$).

Table 2 Coefficient B

Γ	G	B
$\Gamma \leq 9.5$	$G \leq 500$	4.8
	$500 < G < 1900$	$2400/G$
	$G \geq 1900$	$55/G^{0.5}$
$9.5 < \Gamma < 28$	$G \leq 600$	$520/\Gamma G^{0.5}$
	$G > 600$	$21/\Gamma$
$\Gamma \geq 28$	-	$15000/\Gamma^2 G^{0.5}$

가장 적은 B-coefficient 상관식을 기반으로 하였다. 실험값과 B-coefficient와의 편차를 Fig. 8에 나타내었다. 전반적으로 실험값보다 큰 값을 예측하고 있음을 알 수 있다.

또한 임계점 부근에서 작은 표면장력을 갖는 이산화탄소의 물성치 특성을 고려하기 위하여 관성력과 표면장력의 비로 정의되는 Weber 수를 상관식에 포함시켰다. 식(7)과 같은 형태의 압력강하 상관식을 개발하였다. 상관식에 사용된 계수 B는 Table 2에 나타내었다.

$$\psi_{f,bo}^2 = 1 + 4.2(\Gamma^2 - 1) \times \left[\frac{B}{We_D} x^{0.875} (1-x)^{0.875} + x^{1.75} \right] \quad (7)$$

식(7)의 이산화탄소 압력강하 상관식을 이용하

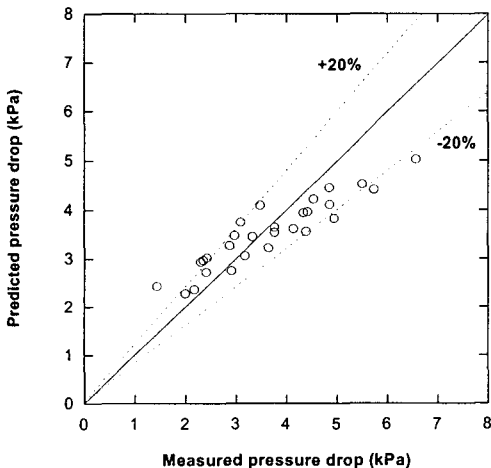


Fig. 9 Comparison between the predictions of present correlation of two-phase pressure drop and experimental data.

여 예측한 값과 실험에서의 측정값과의 편차를 Fig. 9에 나타내었다. 본 연구에서의 압력강하 상관식으로 예측한 값과 실험결과와의 절대평균편차(absolute average deviation)가 16.2%이다.

5. 결 론

본 연구에서는 임계점 부근에서 증발과정이 이루어지는 이산화탄소에 대하여 증발열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 임계건도 및 무차원수를 이용한 새로운 상관식을 개발하였다.

(1) 증발과정중 특정한 건도 이상의 영역에서는 열전달계수가 급격히 감소하는 임계건도(critical quality)를 구하였으며, 기존의 냉매에 비해 표면장력과 점성이 낮은 이산화탄소의 임계건도를 구하기 위하여 본 연구에서는 Reynolds 수, boiling 수, Bond 수를 사용하여 질량유속, 열유속, 포화온도의 영향을 고려하였다.

(2) 임계건도를 이용한 새로운 이산화탄소 증발열전달상관식을 개발하였다. 임계건도 이전에는 Liu and Winterton⁽⁸⁾의 상관식을 기반으로, 임계건도 이후의 영역에는 액막이 파괴된 부분에는 Dittus-Boelter⁽¹¹⁾의 상관식을, 액막이 존재하는 부분에는 기상 Gungor and Winterton⁽¹²⁾의 상관식을 함께 사용하였는데, 본 상관식은 실험결과와 절대표준편차 15.3%를 나타내었다.

(3) 이산화탄소의 2상유동 압력강하 상관식은 B-coefficient⁽¹⁵⁾ 상관식을 기반으로 하고, Weber 수를 도입하여 표면장력의 영향을 고려하여 제안하였으며, 실험결과와 16.2%의 편차를 보였다.

후 기

본 연구는 마이크로 열시스템 연구센터의 지원 및 산업자원부의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

- Lorentzen, G. and Pettersen, J., 1993, A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning, Int. J. Refrigeration, Vol. 16, No. 1, pp. 4-12.

2. 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, HVAC&R Research, Vol. 4, No. 3, pp. 281-301.
3. Bredesen, A. M., Hafner, A., Pettersen, J., Nekså, P. and Aflekt, K., 1997, Heat transfer and pressure drop for in-tube evaporation of CO₂, Proceedings, IIF-IIR Commission B1, with E1 & E2, College Park (U.S.A), pp. 35-49.
4. Hwang, Y., Kim, B.H. and Radermacher, R., 1997, Boiling heat transfer correlation for carbon dioxide. IIF-IIR Commission B1, with E1&E2, College Park (U.S.A.), pp. 81-95.
5. Hihara, E. and Tanaka, S., 2000, Boiling Heat transfer of carbon dioxide in horizontal tubes, IIF-IIR Commissions B1, B2, E1, and E2, pp. 279-284.
6. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, NIST thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures database (REFPROP), Version 6.0, National Institute of Standards and Technology, Boulder, Co, U.S.A.
7. Kattan, N., Thome, J.R. and Favrat, D., 1998, Flow boiling in horizontal tubes: Part 1-Development of a diabatic two-phase flow pattern map, J. Heat Transfer, Vol. 120, pp. 140-147.
8. Kefer, V., Koehler, W. and Kastner, W., 1989, Critical heat flux (CHF) and post-CHF heat transfer in horizontal and inclined evaporator tubes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 15, No. 3, pp. 385-392.
9. Liu, Z. and Winterton, R. H. S., 1991, A general correlation for saturated and sub-cooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 11, pp. 2759-2766.
10. Kattan, N., Thome, J.R. and Favrat, D., 1998, Flow boiling in horizontal tubes: Part 3-Development of a new heat transfer model based on flow pattern, J. Heat Transfer, Vol. 120, pp. 156-165.
11. Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., 1930, Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, University of California Publications of Engineering, Vol. 2, pp. 443-461.
12. 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.
13. Jung, D. S., McLinden, M., Radermacher, R. and Didion, D. A., 1989, Study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1751-1764.
14. Kandlikar, S. G., 1990, A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes, J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 219-228.
15. Chisholm, D., 1983, Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers, Longman.
16. Jung, D. S. and Radermacher, R., 1989, Prediction of pressure drop during horizontal annular flow boiling of pure and mixed refrigerants, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 32, No. 12, pp. 2435-2448.