

수평관내 이산화탄소의 증발 열전달 특성

손 창 효, 이 동 건, 김 영 룰*, 오 후 규**

부경대학교 냉동공학과, *한국생산기술연구원 신에너지환경팀, **부경대학교 냉동공학과

Evaporative Heat Transfer Characteristics of Carbon Dioxide in a Horizontal Tube

Chang-Hyo Son, Dong-Gun Lee, Young-Lyoul Kim*, Hoo-Kyu Oh**

Department of Refrigeration Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

*Advanced Energy & Environment Research Team, KITECH, Chonan 330-825, Korea

**Department of Refrigeration Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received March 15, 2004; revision received October 13, 2004)

ABSTRACT: The evaporative heat transfer coefficient of CO₂ (R-744) in a horizontal tube was investigated experimentally. The experiments were conducted without oil in a closed refrigerant loop which was driven by a magnetic gear pump. The main components of the refrigerant loop are a receiver, a variable-speed pump, a mass flow meter, a pre-heater and evaporator (test section). The test section consists of a smooth, horizontal stainless steel tube of inner diameter of 7.75 mm. The experiments were conducted at mass flux of 200 to 500 kg/m²s, saturation temperature of -5 to 5°C, and heat flux of 10 to 40 kW/m². The test results showed the heat transfer of CO₂ has a greater effect on nucleate boiling more than convective boiling. Mass flux of CO₂ does not affect nucleate boiling too much, and the effect of mass flux on evaporative heat transfer of CO₂ is much smaller than that of refrigerant R-22 and R-134a. In comparison with test results and existing correlations, correlations failed to predict the evaporative heat transfer coefficient of CO₂, therefore, it is necessary to develop reliable and accurate predictions determining the evaporative heat transfer coefficient of CO₂ in a horizontal tube.

Key words: Evaporation(증발), Heat transfer coefficient(열전달계수), Supercritical cycle(초월임계 사이클)

기 호 설 명

d : 관경 [m]

G : 질량유속 [kg/m²s]

h : 열전달계수 [W/m²K]

P : 압력 [Pa]

Q : 전열량 [kW]

q : 열유속 [kW/m²]

T : 온도 [°C]

x : 건도

Δz : 소구간의 길이 [m]

† Corresponding author

Tel.: +82-51-621-6802; fax: +82-51-620-1501

E-mail address: headam@pknu.ac.kr

하첨자

cp : 임계점
 e : 증발
 i : 내측
 in : 입구
 loc : 국소값
 re : 냉매
 rp : 환산
 sat : 포화
 w : 관벽

1. 서 론

CFC계 및 HCFC계 냉매가 오존층 파괴 및 온실효과의 원인물질로 밝혀진 이후, 이를 대체할 수 있는 물질을 개발하기 위한 연구들이 다각적으로 이루어져 왔다. 최근 들어 지구환경에 영향이 적은 자연냉매에 관심이 높아지고 있고, 이와 같은 상황에 CO₂(R-744)는 자연냉매이고, 환경친화적이며, 주위환경에서 쉽게 구할 수 있기 때문에 서구 선진국을 중심으로 주목을 받기 시작했다. 그러나 CO₂를 냉동·공조 장치에 적용할 경우, 시스템 압력이 상당히 높아지기 때문에 압축기와 열교환기(증발기와 응축기)를 재설계할 필요가 있다. 특히 CO₂를 작동유체로 사용하는 냉동·공조 시스템에서 증발기는 중요한 구성요소이므로 증발기에서의 열전달 특성을 파악하는 것은 필수적이다. 수평관내 CO₂의 증발 열전달에 있어서 작동매체인 CO₂의 비체적, 비열, 밀도, 표면장력 등의 물성

치가 크게 변화하므로 기존의 프레온계 냉매의 증발 열전달 특성과는 상당히 다른 결과를 보고⁽¹⁻³⁾하고 있다. 현재 CO₂의 증발과정 중에 발생하는 전열기구에 대한 규명은 CO₂의 복잡한 유동형태와 물성치로 인해 아직 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다. 그리고 CO₂ 냉매의 증발전열 특성에 대한 연구는 대단히 부족한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 CO₂를 작동유체로 사용하여 내경 7.75 mm 관에서 증발과정 중의 열전달 특성을 분석하고, 기존 상관식과도 비교·검토함으로써 CO₂용 증발기의 기초설계 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치를 나타낸 것이다. 실험장치는 강제순환식 폐루프이고, CO₂ 순환 루프와 냉각수 순환 루프로 구성되며 다음과 같은 경로로 이루어진다. 수액기에 액상으로 충전된 냉매액은 구동원인 냉매펌프에 의하여 구동되어 전자식 질량유량계로 들어간다. 질량유량계에서 유량이 측정된 냉매액은 전기 히터에 의해 가열되는 예열기로 흡입되어 일정 건도를 가진 냉매증기로 된다. 예열기를 나온 냉매증기는 시험부인 증발기로 유입되어 증발과정을 거친 후, 응축기에서 응축이 완료된 후 수액기로 흡입되도록 하였다. 이렇게 수액기로 순환된 냉매액은 냉매펌프로 재순환 된다. 증발기 시험부의 상세도는 Fig. 2에 나타내었다. 시험부는 냉매가 흐르는

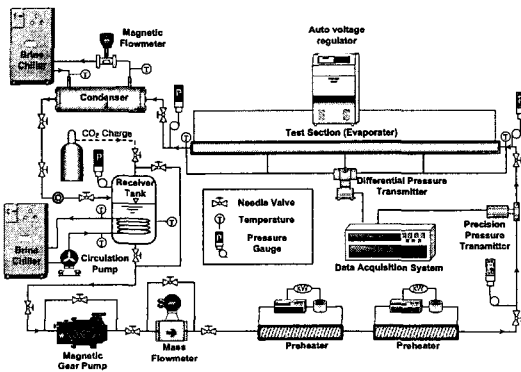


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for evaporative heat transfer test.

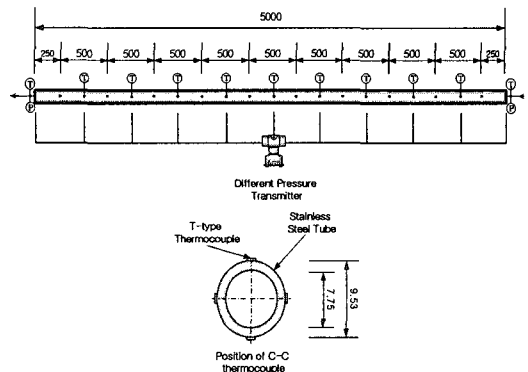


Fig. 2 Schematic diagram of test section for evaporative heat transfer test.

Table 1 Experiment conditions

Contents	R-744
$T_{e, sat}$ (°C)	-5, 0, 5
G_{re} (kg/m ² ·s)	200, 300, 400, 500
d_i (mm)	7.75
q_e (kW/m ²)	10, 20, 30, 40

내관과 냉각수가 흐르는 외관으로 이루어진 이중관형 열교환기이다. 내관은 내경 7.75 mm, 외경 9.53 mm, 길이 5,000 mm인 수평 평활관으로 제작하였다. 그리고 시험부는 입·출구를 제외하고, 입구에서 500 mm씩 동일간격으로 10개 구간으로 나누었으며, 각 구간에는 냉매, 관벽, 냉각수 온도 및 차압을 각각 측정할 수 있도록 하였다. 실험데이터는 장치가 정상상태에 도달하였을 때 온도, 압력과 질량유량을 각각 측정한다. Table 1은 실험조건을 정리한 것이다. 본 연구에서 사용된 CO₂에 대한 물성치는 냉매 물성치 계산 프로그램인 REFPROP(version 6.02)를 이용하여 계산하였다.

2.2 데이터 처리 방법

증발과정에서 관의 원주방향으로의 열전달계수는 시스템의 성능에 많은 영향을 미치므로, 원주방향으로의 열전달계수를 계산할 필요가 있는데, 이러한 국소 열전달계수는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_{e, loc} = \frac{q_e}{T_{e, w, in} - T_e} \quad (1)$$

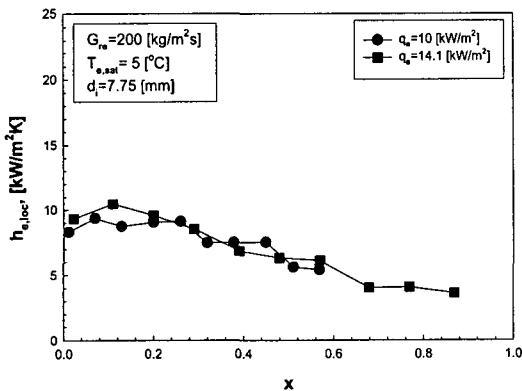


Fig. 3 Variation of evaporating heat transfer coefficients with respect to quality.

여기서, $h_{e, loc}$ 은 증발기의 소구간 국소 열전달계수[kW/m²·K]를 나타내며, T_e 은 증발기에서의 냉매온도[K]이고, $T_{e, w, in}$ 는 증발기에서의 관벽 내표면 온도[K]이다. 증발기의 외벽면에 설치된 열선으로 공급되는 열유속 q_e [kW/m²]는 다음과 같은 식(2)로부터 계산하였다.

$$q_e = \frac{Q}{\pi \cdot d_i \cdot \Delta z} \quad (2)$$

식(2)에서, Q 는 열평형식으로 계산되는 전열량[kW], d_i 는 평균 관내경[m]이고, Δz 는 소구간의 길이[m]를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 국소 증발 열전달

3.1.1 건도의 영향

Fig. 3은 CO₂를 사용하여 내경 7.75 mm 관에서 구한 국소 열전달계수를 건도의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것처럼, $x > 0.1$ 보다 높은 영역에서, 건도가 증가할수록 국소 증발 열

Table 2 Thermophysical properties of refrigerants investigated.

Refrigerant			R-744	R-22
Saturation density [kg/m ³]	Liquid	-5°C	956.7	1298
		0°C	928.1	1282
		5°C	896.7	1264
	Vapor	-5°C	83.14	18.09
		0°C	97.32	21.23
		5°C	114.1	24.79
Saturation viscosity [μ Pa·s]	Liquid	-5°C	115.2	230.4
		0°C	105.4	218.2
		5°C	95.84	206.7
	Vapor	-5°C	13.85	11.28
		0°C	14.31	11.5
		5°C	14.83	11.73
Surface tension [mN/m]	-	-5°C	5.51	12.45
	-	0°C	4.55	11.7
	-	5°C	3.64	10.95

전달계수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 Table 2에 나타난 것처럼, 동일 포화온도에서 CO₂가 R-22에 비해서 액상의 점성계수가 약 1/3 정도 낮고, 표면장력이 약 1/3 정도 낮기 때문에, 증발이 진행됨에 따라 관내벽을 둘러싸고 있는 액막이 쉽게 얇아지고, 중력의 영향으로 인해 액막은 관의 측부와 하부에 형성되게 된다. 관 상부는 액막이 형성되지 못하고, 기상의 CO₂가 관내벽면에 직접 접촉하여 드라이 아웃이 발생한다. 즉, 수평관내 증발과정 중에 관내측 상부의 액막은 얇아지고, 건도의 증가와 함께 액막은 사라진다. 이로 인해 관내측 상부의 벽면온도는 갑자기 상승하고, 증발 열전달계수는 감소하게 된다.

저건도 영역(0 < x < 0.1)에서 증발 열전달계수는 건도가 증가할수록 열전달계수가 약간 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 건도가 증가할수록 기공률(void fraction)이 증가하고, 이로 인해 액막의 두께가 감소하기 때문에 증발 열전달계수가 상승하는 것으로 판단된다.

3.1.2 열유속의 영향

Fig. 4는 일정한 질량유속에서 CO₂의 국소 증발 열전달계수를 건도 변화에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열유속이 증가할수록 국소 증발 열전달계수가 증가하는 경향으로 나타났다. 이는 저건도에서만 발생하는 핵비등 현상이 증발이 진행되어 건도가 높아지면 핵비등이 활성화되고 CO₂의 증발 열전달계수가 열유속의 영향을 받는 것을 의미한다. 그 이유는 CO₂의 액상에

대한 기상의 비체적이 프레온계 냉매보다 작고, 기상의 속도가 액상의 속도에 비해서 크지 않기 때문에 고건도 영역에서도 증발 열전달계수는 핵비등의 영향을 받는다.

3.1.3 질량유속의 영향

Fig. 5는 CO₂를 사용하여 내경 7.75 mm 관에서 얻은 결과를 냉매의 질량유속 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서처럼 CO₂의 질량유속이 증가하여도 국소 증발 열전달계수는 거의 증가하지 않는다. 이는 수평관내 CO₂의 증발열전달은 강제대류 비등보다 핵비등의 영향이 지배적임을 의미한다. 이러한 경향은 Tran et al.⁽⁴⁾의 연구결과와 일치하는 것이다. 즉, 일반적으로 질량유속이 증가할수록 강제대류 비등이 향상되지만, CO₂는 Table 2에 나타난 것처럼, 액상과 기상의 밀도비가 작고 속도비가 크지 않기 때문에 강제대류 비등이 억제된다. 따라서, 질량유속의 증가는 CO₂의 핵비등 현상에 큰 영향을 주지 못한다. 다시 말해서, CO₂의 증발 열전달계수는 질량유속 증가에 거의 변하지 않는다. 또한 CO₂의 열전달계수에 미치는 질량유속의 영향은 기존의 프레온계 냉매에 비해서 작다.

3.1.4 포화온도의 영향

Fig. 6은 일정한 질량유속에서 CO₂의 포화온도 변화에 따른 국소 증발 열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, CO₂의 포화온도가 증가할수록 증발 열전달계수는 증가하는 경향으로

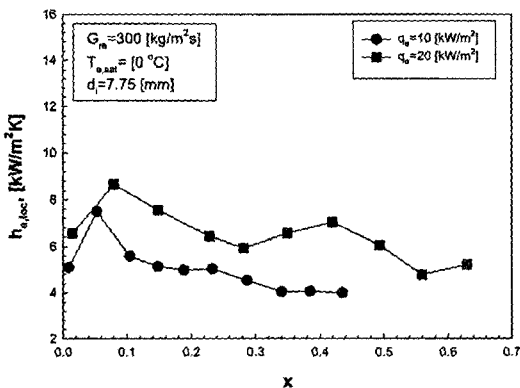


Fig. 4 Variation of evaporating heat transfer coefficients for different heat fluxes at constant mass flux.

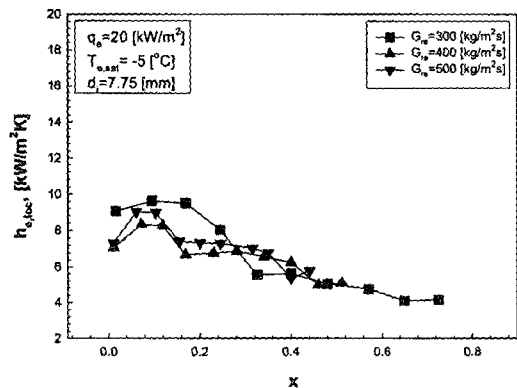


Fig. 5 Variation of evaporating heat transfer coefficients for different mass fluxes at constant heat flux.

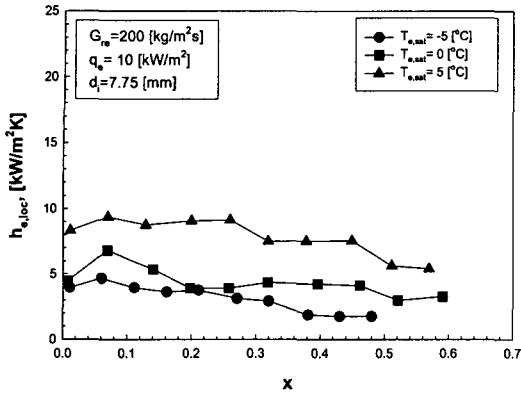


Fig. 6 Variation of evaporating heat transfer coefficients with different saturation temperature for constant heat and mass flux.

로 나타났다. 핵비등 영역에서 관벽면으로부터 기포의 발생과 이탈은 중요하다. 따라서 Table 2에 나타낸 것처럼, 일정한 열유속 조건에서 포화온도가 높아질수록 CO₂의 액상에 대한 기상의 비체적 비율이 높아지고, 이로 인해 기포의 부력과 이탈빈도는 증가되며, 핵비등이 더욱 활발하게 일어나기 때문에 포화온도에 따른 증발 열전달계수가 증가하는 것으로 판단된다. 특히, CO₂는 기존 냉매에 비해서 표면장력이 낮기 때문에 이러한 경향이 뚜렷하게 나타난다. Cooper⁽⁵⁾는 핵비등 열전달계수에 포화압력과 환산압력($P_{red} = P_{re}/P_{cp}$)이 영향을 미친다고 하였다. 따라서 포화온도가 증가할수록 포화압력과 환산압력이 증가하고, 이로 인해 액상과 기상의 밀도차가 감소한다. 결국에는 액상과 기상의 밀도차가 감소하면 기포의 유동면적이 증가되어 핵비등 증발 열전달계수는 증가한다.

따라서, 본 실험범위에서 CO₂의 증발 열전달 특성은 대류비등보다 핵비등에 영향을 많이 받고, 질량유속보다 열유속과 포화온도의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3.2 종래의 증발 열전달 상관식과 비교

수평 증발관내 국소 열전달계수를 예측하기 위해서 제안된 타 연구자들의 예측식에는 Shah,⁽⁶⁾ Gungor-Winterton,⁽⁷⁾ Kandlikar,⁽⁸⁾ Jung et al.,⁽⁹⁾ Liu-Winterton⁽¹⁰⁾ 등이 있다. 본 절에서는 이들 상관식들과 증발 데이터를 비교·검토하고, 그 적

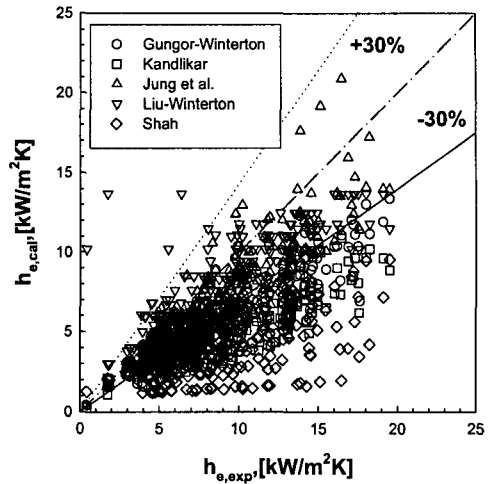


Fig. 7 Comparison between measured heat transfer coefficients and calculated heat transfer coefficients.

용 가능성에 대해서 고찰하였다.

Fig. 7은 수평관내 CO₂의 증발 열전달에 대한 결과를 위에서 언급한 종래의 상관식과 비교한 것이다. 그림에서와 같이 모든 상관식들은 실험으로 측정된 증발 열전달계수보다 과소 예측되나, Liu-Winterton 상관식은 과대 예측된다. 그리고 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar의 상관식은 본 실험값보다 30%이상 과소 예측하는 경향을 보인다. 상관식들 중에서 실험값과 가장 근접한 것은 Jung 등의 상관식으로 평균 이탈 정도가 21.64%였다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 실험 조건에서 질량유속과 열유속이 증가할수록 기존의 상관식과의 이탈 정도는 큰 것으로 나타났다. Table 3은 각각의 상관식과 실험값 사이의 오차를 나타낸 것이다.

Table 3 The errors between measured and calculated heat transfer coefficient

Authors	Deviation	Average deviation (%)	Mean deviation (%)
Shah (1982)		-47.28	49.05
Gungor-Winterton (1986)		-32.39	32.7
Jung et al. (1989)		-14.26	21.64
Kandlikar (1989)		-38.9	39.22
Liu-Winterton (1991)		12.59	32.61

4. 결 론

CO₂를 이용한 냉동·공조 시스템용 열교환기의 최적 설계를 위해서 CO₂ 냉매의 증발과정 중에 열전달 특성에 대해서 실험한 결과, 다음과 같이 정리하였다.

(1) 저건도 영역에서는 핵비등이 지배적이기 때문에 증발 열전달계수는 약간 증가한다. 이는 보이드율의 증가로 인해서 액막의 두께가 감소하기 때문이다. 고건도 영역으로 갈수록 증발 열전달계수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 CO₂의 표면장력과 점성계수가 프레온계 냉매에 비해서 상당히 작으므로 관내벽면 주위로 형성되는 액막이 쉽게 파괴되기 때문이다.

(2) 수평관내 CO₂의 증발 열전달에 대한 실험으로 획득한 결과를 Shah, Gungor-Winterton, Kandlikar, Jung 등, Liu-Winterton에 의해서 제안된 상관식과 비교한 결과, Jung 등의 상관식이 평균 오차 21.64%로 가장 좋은 일치를 보였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 차세대 신기술 개발사업 중에 '환경친화적인 자연냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발' 과제와 BK 사업단의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Yoon, S.H., 2002, Studies on the characteristics of evaporation and supercritical gas cooling heat transfer of carbon dioxide, Seoul National University, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy.
2. Yun, L., Kim, Y.C. and Kim, M.S., 2003, Two-phase flow patterns of CO₂ in a narrow rectangular channel, International Congress of Refrigeration 2003, Washington D. C., pp. 1-7.
3. Yun, B., Park, H.Y., Yoo, K.C. and Kim, Y.C., 1999, Air-conditioner cycle simulation using tube-by-tube method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 499-510.
4. Tran, T.N., Wambsganns, M.W. and France, D.M., 1966, Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, No. 3, pp. 485-498.
5. Cooper, M.G., 1984, Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling a wide-ranging examination using reduced properties, Advances in Heat Transfer, Vol. 16, pp. 157-239.
6. Shah, M.M., 1979, A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 22, pp. 157-165.
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.
8. Kandlikar, S.G., 1990, A general correlation for saturated two-phase flow boiling horizontal and vertical tubes, Trans. ASME, Vol. 112, pp. 219-228.
9. Jung, D.S., Mclinden, M., Radermacher, R., and Didion, D., 1989, A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1751-1764.
10. Liu, Z. and Winterton, R.H.S., 1991, A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 1, pp. 2759-2766.