

수평 평활관내 CO₂ 증발열전달 및 압력강하에 관한 연구

이상재, 최준영*, 이재현**, 권영철***†

한양대학교 대학원, *한국산업기술시험원, **한양대학교 기계공학부, ***선문대학교 기계공학부

Study on CO₂ Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop in a Horizontal Smooth Tube

Sang-Jae Lee, Jun-Young Choi*, Jae-heon Lee**, Young-Chul Kwon***†

Department of Mechanical Engineering, Graduate School Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

*Korea Testing Laboratory, Seoul 152-848, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

***Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University, Chungnam, 336-708, Korea

(Received February 9, 2007; revision received August 6, 2007)

ABSTRACT: Experimental study on the heat transfer characteristics of CO₂ in a horizontal smooth tube was carried out to investigate the heat transfer coefficient and pressure drop during evaporation of CO₂. The experiment apparatus consisted of a test section, a DC power supply, a heater, a chiller, a mass flow meter, a pump and a measurement system. Experiment was conducted for various mass fluxes (200~1200 kg/m²s), heat fluxes (10~100 kW/m²) and saturation temperatures (-5, 0, 5°C). With increasing the heat flux, the evaporation heat transfer coefficient increased. But the variation of the heat transfer coefficient on the increase of the mass flux was not large. And the significantly drops of the heat transfer coefficient was observed at any heat flux and mass flux because of the change of the flow pattern in the tube. With increasing the saturation temperature, the heat transfer coefficient increased due to the promotion of a nucleate boiling. The measured pressure drop during evaporation increased with increasing the mass flux and decreasing the saturation temperature.

Key words: Evaporation(증발), Heat transfer(열전달), CO₂(이산화탄소), Quality(건도), Pressure drop(압력강하)

기호설명

D	: 관경 [m]
G	: 질량유속 [kg/m ² s]
h	: 열전달계수 [W/m ² °C]
k	: 열전도도 [W/m°C]
L	: 길이 [m]

Q	: 열전달률 [kW]
q"	: 열유속 [kW/m ²]
T	: 온도 [°C]
x	: 건도

하침자

* Corresponding author

Tel.: +82-41-530-2396; fax: +82-41-530-2981

E-mail address: yckweon1@sunmoon.ac.kr

fg	: 포화액/기체 물성치 변화
i	: 관 내표면
o	: 관 외표면

sat : 포화온도
 w : 관벽
 x : 위치

1. 서 론

산업의 고도화와 환경문제로 지구온난화와 오존층 파괴를 유발하는 CFC 및 HCFC 계열의 냉매가 규제물질로 지정됨에 따라 이들 냉매를 대신할 수 있는 환경 친화적인 여러 대체 냉매들에 대한 연구가 활발하다. 특히 이들 대체 냉매들 중 CO_2 는 천연 냉매로서의 장점과 더불어 독성과 인화성이 없을 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 큰 장점을 지니고 있다. 또한 기존 냉매에 비하여 단위체적당 냉각능력이 크고 응용온도 범위에서 압력비가 작으므로 냉매 사이클에 적용시 보다 좋은 성능을 낼 수 있다. 최근 CO_2 를 대체 냉매로 적용한 냉동 사이클 개발에 대한 연구가 여러 연구자들에 의해 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾

Hwang⁽³⁾은 Bredesen의 연구결과를 이용하여 널리 사용되고 있는 상관식들이 큰 오차를 가지고 있음을 확인하였고, 수평평활관내 CO_2 증발 열전달계수를 예측하기 위해 Bennett-Chen 상관식을 수정한 새로운 상관식을 제안하였다. Zhao et al.⁽⁴⁾은 수평 평활관내 CO_2 의 증발 열전달특성에 대한 연구로부터 측정된 열전달계수가 Bredesen의 결과에 비해 약간 낮았지만 유사한 경향을 가짐을 보였다. 또한 CO_2 증발 열전달계수가 기존 냉매들에 비해 월등히 높음을 나타내었다.

Cho⁽⁵⁾는 내경 7.75 mm, 길이 5m인 수평 평활관내 CO_2 의 증발열전달 특성에 대한 연구로부터 벽면과열도와 열전달계수의 관계 및 질량유속, 열유속, 포화온도의 변화에 따른 열전달 변화특성에 대해 관찰하였으며, 또한 Gungor and Winterton 상관식과 실험 데이터를 비교하여 평균 38.6%의 차이가 나는 것을 확인하였다. Son⁽⁶⁾은 CO_2 의 증발과 가스냉각으로 나누어 실험을 수행하였으며 특히 증발실험은 내경이 7.75 mm이고 길이가 5m인 수평 평활관을 사용하였다. 증발 압력강하를 기준의 Domanski 상관식과 비교하여 약 13.9%의 오차내에서 비교적 좋은 일치를 보였고 열전달 특성은 Jung et al.의 상관식과 비교하여 약 21.6%의 오차가 나는 것을 확인하였다. Yun⁽⁷⁾은 16 mm × 2 mm의 넓적한 직사각형 채널에서 CO_2 의 질량

유속에 따른 유동형태를 가시화 실험을 통해 확인하였다. 대부분 기표류, 슬러그류, 환상류로 관찰되었으며, 질량유속이 작을 경우 치언(Churn)류가 질량유속이 커질수록 부분적으로 슬러그류(Slug)가 관찰되었다. 질량유속이 더 커질 경우 저전도에서 환상류가 확인되었다.

선행된 여러 실험(Fig. 1)들은 비교적 좁은 질량유속과 열유속 범위내에서 CO_2 의 증발 열전달 연구를 수행하였지만, 실제 열교환기 설계 자료로 사용되기 위해서는 보다 넓은 실험범위에서 열전달 특성을 조사할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서 내경 7.75 mm의 수평 평활관에서 포화온도 -5~5°C, 질량유속 200~1200 kg/m²s, 열유속 10~100 kW/m² 실험범위내에서 증발 열전달 특성과 압력강하를 연구하였다.

2. 실험장치

2.1 실험장치

CO_2 가 관 내부에서 기화할 때, 관벽과 CO_2 사이의 증발 열전달계수를 산출하기 위한 실험장치를 Fig. 2에 나타내었다. CO_2 는 순환용 기어펌프에 의해 순환되고 질량유량계에서 밀도와 유량이 측정된다. 실험부의 입구온도 및 입구 압력 조건을 만족하기 위해 부냉각기(sub-chiller)와 예열기(pre-heater)가 있다. 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하기 위해 시험부에는 열전대와 압력센서가 있다. 실험부에 직접 가열방식으로 열량을 공급하기 위해 500 A, 30 V의 대용량 직류 전원 공급 장치를 설치하였으며, 실험부를 지난 이상

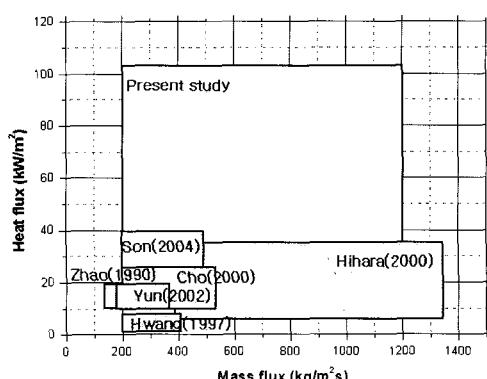


Fig. 1 Comparison of experimental range.

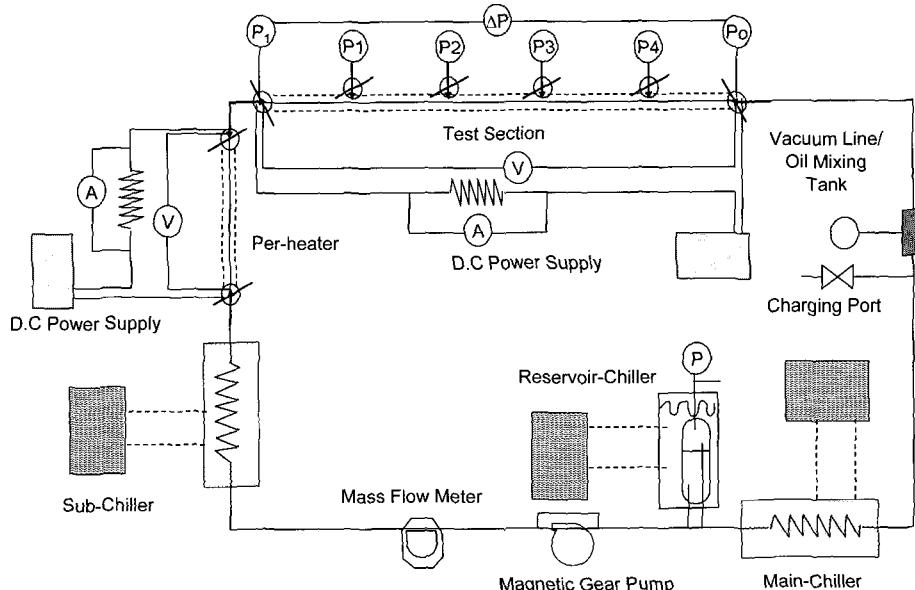


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

상태의 CO₂는 주냉각기(main chiller)에서 과냉각 상태로 환원된다.

길이 5m의 스테인레스관으로 제작된 실험부를 Fig. 3에 나타내었다. 포화온도를 결정하기 위한 국소 압력은 실험부에 1m 간격으로 설치된 압력 센서에서 측정하였고, 실험부에 의한 압력강하를 측정하기 위해 실험부 양단에 차압계를 설치하였다. 실험부의 길이에 따른 외벽면 온도 측정을 위한 T형 열전대는 실험부 입구를 기준으로 50 cm 간격으로 관 외벽에 10지점에 부착되었으며, 이때 한 지점에서의 온도는 관의 원주방향 중심을 기준으로 90°의 각도로 네 곳에서 측정된다. 그림의 하단부에 위치한 원주방향 단면도에서 보

듯이 외부와의 열전달을 최소화하기 위해 단열재로 실험부 외부를 단열하였다. 직접 가열방식을 사용하였으므로 실험자의 안전을 고려하여 누전을 막기 위해 실험부의 양단에는 절연파킹을 판벽에는 절연제를 이용하여 전기 절연하였다.

2.2 실험방법 및 조건

CO₂는 고압의 중발압력을 가지므로 실험장치의 안전성을 확인하기 위해 실험전에 40 kgf/cm²의 고압 질소로 내압 실험을 수행하였다. 전공펌프를 이용하여 실험장치 내부를 진공한 후, 순수 CO₂를 충전하였다. CO₂가 실험부에 유입된 후에 실험과정에서 정상상태의 도달 여부는 입구온도 ± 0.1°C 이내, 입구압력 ± 0.1 kgf/cm²이내, 설정된

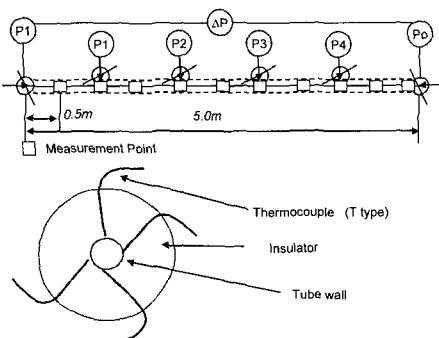


Fig. 3 Schematic diagram of the test section.

Table 1 Experimental conditions

Tube I.D. [mm]	T_{sat} [°C]	G [kg/m ² s]	q'' [kW/m ²]
7.75	-5	200	10, 17.1
		400	10, 20, 30
	0	600	10, 20, 30, 51.2
		800	10, 20, 30, 60, 64.4
	5	1000	10, 20, 30, 60, 85.5
		1200	10, 20, 30, 60, 102.5

질량유량 $\pm 3\%$ 이내의 조건에서 확인하였다.

측정된 데이터는 정상상태에서 10분 동안 다채널 기록계로 GPIB 통신을 통해 컴퓨터에 기록된다. 실험부의 길이방향으로 국소 외벽면 온도는 동일위치에서 측정된 4 지점의 외벽면 온도를 산술평균하여 산정하였다. 관벽면과 CO₂ 간의 증발 열전달계수는 Table 1과 같은 실험 조건에 대해 측정되었다.

3. 열전달계수 산정

실험부의 증발 열전달계수는 관 반경방향의 1차원 열전도 해석으로 다음과 같이 구하였다.

$$h_x = \frac{q''}{T_{i,x} - T_{sat}} \quad (1)$$

실험부에 가해진 열유속 q'' 은 다음 식으로 계산하였다.

$$q'' = \frac{Q}{\pi D_i L} \quad (2)$$

$T_{i,x}$ 는 정상상태 1차원 열전도 방정식을 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$T_{i,x} = T_{o,x} - \frac{Q}{2 \pi k_w L} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \quad (3)$$

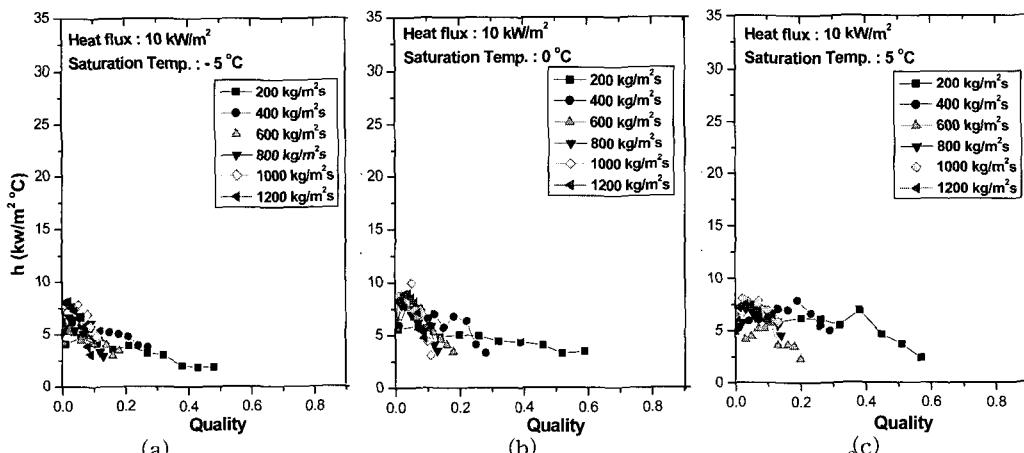


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient on quality. [Heat flux : 10 kW/m², Saturation temperature : -5, 0, 5 °C, Mass flux : 200~1200 kg/m²s].

CO₂는 실험부에 인가되는 열유속으로 인해 증발되기 시작되며, 이상상태(two-phase)가 되면 전도로 증발량을 나타낸다. 균일 열유속이 가해지는 수평판에서 x 위치에서의 전도는 식(4)로 구하였다.

$$x_x = \frac{4 Q (L_x/L)}{\pi D_i^2 G i_{fg}} \quad (4)$$

실험에서 획득한 온도 데이터는 식(1)에서 식(3)을 이용하여 열전달계수를 산정하고 식(4)에서 인가된 열량을 전도로 나타내어 전도변화에 따른 열전달계수의 그래프로 실험결과를 표현하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 질량유속 변화에 따른 증발 열전달계수

Fig. 4는 열유속은 10 kW/m²으로 고정하고 질량유속 200~1200 kg/m²s의 범위에서 200 kg/m²s 단위로 증가하며 포화온도는 -5 °C, 0 °C, 5 °C인 각각의 경우에 대해 전도에 따른 증발 열전달계수를 나타내었다. 질량유속의 변화가 열전달계수에 미치는 영향을 확인하기 위해 질량유속은 Re 수로 열전달계수는 Nu 수로 하여 Nu/Re의 기울기를 확인하였다. Nu/Re = 0.03으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 이로부터 질량유속이 열전달계수에 미치는 영향은 크지 않음을 확인할 수 있었으

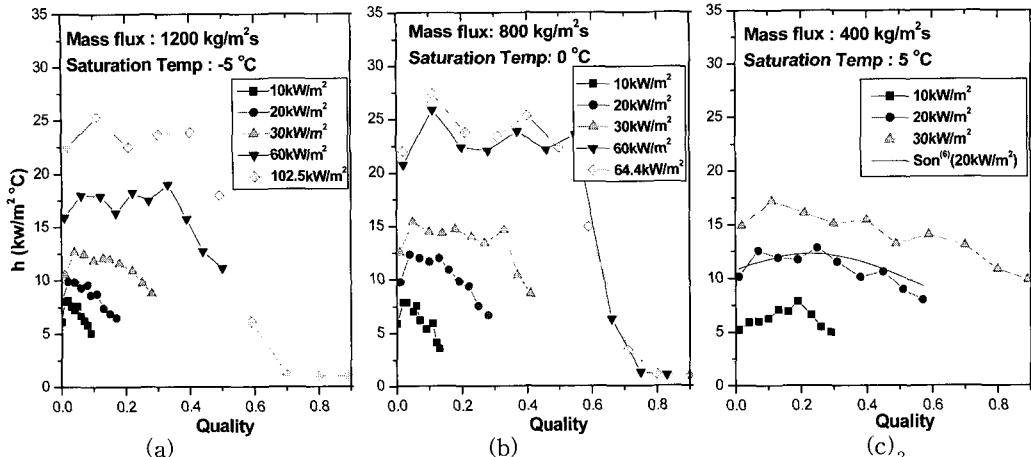


Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient on quality. [Heat flux : $10 \sim 100 \text{ kW}/\text{m}^2$, Mass flux : $400, 800, 1200 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, Saturation temperature : $-5, 0, 5^\circ\text{C}$].

며, 이와 같은 경향은 다른 연구자들의 결과에서도 볼 수 있다. 실험에서 획득한 증발 열전달계수의 범위는 대략 $5 \sim 10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 이다. 질량유속이 증가할수록 수평관의 출구건도는 크게 줄어든다. 또한 $600 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ 이상의 질량유속에서는 열전달계수가 다른 질량유속의 경우보다 빨리 증가한 후에 급격히 감소함을 보여주고 있다. 질량유속 $200 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ 와 $400 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ 의 경우, 기존 냉매들은 건도가 증가하면 핵비등이 억제되고 대류비등이 지배적이다. 그러나 CO₂는 기존 냉매에 비해 표면장력과 점성이 작아 액막이 부분적으로 쉽게 파괴되는 현상과 기·액 간의 밀도차의 감소로 인해 대류비등이 억제되고 핵비등이 지배적이다. 핵비등 영역에서는 기포발생이 열전달 측진 메커니즘이므로, 질량유속 증가는 기포 발생 빈도수를 증가시키므로 증발 열전달계수가 커지게 된다. 한편 질량유속이 더욱 빨라지면 계면에서의 전단력에 의해 액막을 유지하지 못하여 오히려 열전달계수가 급격히 감소하는 드라이아웃 발생 가능성을 예측할 수 있으며, 이는 Hihara and Tanaka의 연구에서도 알 수 있다.⁽⁸⁾

4.2 열유속 변화에 따른 증발 열전달계수

Fig. 5(a)는 질량유속 $1200 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 포화온도 -5°C 에서 열유속을 변화시키는 경우에 건도변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. 열유속이 증가함에 따라 증발 열전달계수는 증가한다. 열

유속 $30 \text{ kW}/\text{m}^2$ 이하에서는 건도의 증가에 따라 증발 열전달계수는 감소한다. 열유속 $60 \text{ kW}/\text{m}^2$ 에서는 건도 0.4까지 일정한 범위 내에서 열전달계수가 유지하다가 감소하고 있다. 열유속 $102.5 \text{ kW}/\text{m}^2$ 이상의 경우에 건도 0.4부근에서 드라이아웃이 발생하는 것을 알 수 있다. 저건도 영역에서 드라이아웃이 발생하는 것은 Yun⁽⁷⁾의 가시화 연구로부터 이해할 수 있으며, 수평관내 증발 특성에 따라 유동양식이 기포류에서 환상·분무류로 천이 되기 때문에 드라이아웃이 나타나게 된다.

Fig. 5(b)는 질량유속 $800 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 포화온도 0°C 에서 열유속을 변화시키는 경우에 건도변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. Fig. 5(a)와 유사한 결과를 보이지만, $60 \text{ kW}/\text{m}^2$ 이상인 열유속에서 Fig. 5(a)보다 높은 건도 0.6부근에서 드라이아웃이 발생하였다. 이는 질량유속이 증발 열전달계수에 미치는 영향은 크지 않지만, 드라이아웃의 발생에 영향을 미치고 있음을 보여준다.

Fig. 5(c)는 질량유속 $400 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 포화온도 5°C , 열유속 $20 \text{ kW}/\text{m}^2$ 의 Son의⁽⁶⁾ 실험결과와 비교하였다. 그럼에서 볼 수 있는 것처럼 건도변화에 대한 증발열전달계수의 거동은 유사함을 알 수 있었다. Fig. 5(c)는 질량유속 $400 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 포화온도 5°C 에서 열유속을 변화시키는 경우에 건도변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. 열유속이 증가할수록 높은 열전달계수를 얻을 수 있다. Fig. 5(a)와 (b)와는 달리 실험 범위 내에서 드라이아웃이 발생하지 않았다. 액상유량이 적을 경우

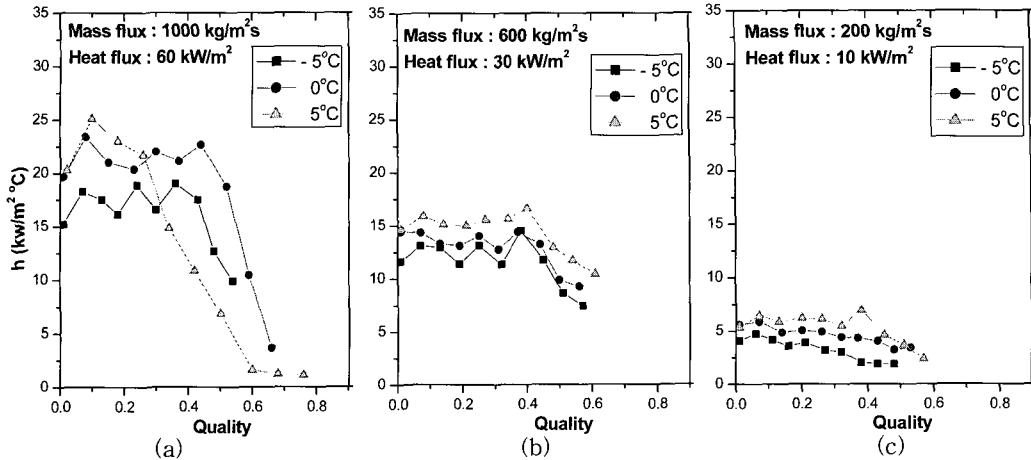


Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient on quality. [Heat flux : 10, 30, 60 kW/m^2 , Mass flux : 200, 600, 1000 $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, Saturation temperature : -5, 0, 5 $^\circ\text{C}$].

에 중력의 영향으로 액상이 관하부에 집중되고 상부에 기상이 존재하는 성층류를 형성하게 되며, 건도가 점차 증가함에 따라 파상류와 환상류로 유동형태가 변하므로 드라이아웃의 발생이 자연되는 것으로 판단된다.

4.3 포화온도 변화에 따른 증발 열전달계수

Fig. 6(a)는 질량유속 $1000 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 열유속 $60 \text{ kW}/\text{m}^2$ 일 경우에 포화온도 변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. 포화온도가 상승함에 따라 높은 증발 열전달계수를 나타내고 있으며, 드라이아웃이 건도 0.3~0.5부근 내에서 발생하였다. 드라이아웃의 발생 건도는 포화온도가 상승할수록 저건도 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 포화온도 상승으로 인해 CO_2 표면장력의 감소와 중력의 영향으로 관 상부의 액막파괴가 더욱 빨라졌기 때문이다.

Fig. 6(b)는 질량유속 $600 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 열유속 $30 \text{ kW}/\text{m}^2$ 일 경우에 포화온도 변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. 실험범위 내에서 급격한 열전달계수의 감소는 나타나지 않았으나, 건도 0.4 이상 영역에서는 증발 열전달계수가 감소함을 알 수 있다. 이는 건도가 증가함에 따라 기·액상간의 속도차가 커지게 되며 이로 인해 관 중심에 기상이 존재하고 관벽면에는 액막이 위치하는 환상류가 형성되며 부분적인 관 상부의 액막파괴 효과로 인해 열전달계수가 감소하기 때문이다.

Fig. 6(c)는 질량유속 $200 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$, 열유속 $10 \text{ kW}/\text{m}^2$ 일 경우에 포화온도 변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. 급격한 열전달계수의 감소는 발생하지 않았으며, 포화온도가 상승하면 증발 열전달계수가 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 포화온도 상승으로 인한 CO_2 의 접성과 표면장력의 감소로 기포발생이 용이하여 핵비등이 원활해지기 때문이다.

4.4 CO_2 의 수평 평활관의 압력강하 특성

Fig. 7은 수평평활관내에서 질량유속이 증가할

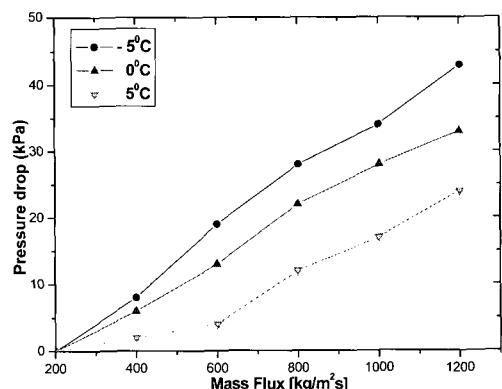


Fig. 7 Variation of pressure drop on mass flux and saturation temperature. [heat flux : $10 \text{ kW}/\text{m}^2$].

때 포화온도 변화에 따른 압력강하를 나타낸다. 포화온도가 상승할수록 동일 질량유속에서 압력강하가 작게 나타나며, 질량유속이 증가할수록 압력강하는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 질량유속의 증가로 마찰손실이 증가하기 때문이다. CO₂는 낮은 점성과 낮은 임계점으로 인해 액상과 기상의 밀도차가 적어 기존의 냉매에 비해 낮은 압력강하를 나타낸다.⁽⁹⁾

5. 결 론

본 연구에서는 질량유속, 열유속 그리고 포화온도를 변화시키면서 내경 7.75 mm, 길이 5.0 m인 수평 평활관에서 CO₂의 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 열유속을 10 kW/m²로 고정하고 질량유속을 200 kg/m²s의 변화량으로 증가시키며 실험하여 질량유속의 변화가 증발 열전달계수의 변화에 미치는 영향은 크지 않으나, 관내 여러 유동양식에 의해 드라이아웃의 발생에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 열유속이 증가하게 되면 증발 열전달계수가 증가한다. 또한 관내 열유속과 질량유속의 변화에 따른 유동형태의 변화에 따라 드라이아웃이 나타나거나 또는 지연되는 것을 알 수 있었다.

(3) 포화온도가 상승하면 증발 열전달계수가 증가한다. 이는 포화온도 증가에 따른 표면장력과 점성의 감소로 인해 핵비등이 촉진되기 때문이다.

(4) 압력강하는 질량유속 증가에 따른 마찰손실로 증가한다. 포화온도가 상승하면 CO₂의 점성력 감소로 압력강하가 감소하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 차세대 신기술 개발 사업 중 ‘환경친화적 자연 냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발’ 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lorentzen, G. and Pettersen, J., 1992, A new, efficient and environmentally benign system for car air-conditioning, International Journal Refrigeration, Vol. 16, No. 1, pp. 4-12.
2. Lorentzen, G., 1995, The use of natural refrigerants : a complete solution to the CFC/ HCFC predicament., International Journal Refrigeration, Vol. 18, No. 3, pp. 190-197.
3. Hwang, Y., 1997, Comprehensive investigation of carbon dioxide refrigeration cycle, Ph.D. thesis, University of Maryland, Maryland, USA.
4. Zhao, Y., Ohadi, M. M., Dessiatoun, S. V., Schuster, A., McNair, A., Radermacher, R. and Darabi, J., 1997, Evaporation heat transfer coefficients of ammonia and CO₂ inside a smooth tube. IIF-IIR Commission B1, with E1&E2, College Park, MD, pp. 116-130.
5. Cho, Y. S., 2000, An experimental study on the characteristics of evaporative heat transfer of carbon dioxide., M.S. thesis, National University of Seoul, Seoul, Korea.
6. Son, C. H., 2004, Heat transfer characteristics of supercritical cycle of carbon dioxide in a horizontal tube, Ph.D. thesis, National University of Pukyong, Pusan, Korea.
7. Yun, L., 2003, Convective boiling of carbon dioxide in mini tubes and micro-channels, Ph.D. thesis, University of Korea, Seoul, Korea.
8. Hihara, E. and Tanaka, S., 2000, Boiling heat transfer of carbon dioxide in horizontal tubes. Preliminary proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen conference on natural working fluids at Purdue. pp. 279-284.
9. Yoon, S. H., 2002, Studies on the characteristics of evaporation and supercritical gas cooling heat transfer of carbon dioxide., Ph.D. thesis, National University of Seoul, Seoul, Korea.