

## 평활관에서 이산화탄소의 증발열전달 특성에 관한 실험연구

이상재 · 최준영\* · 이재현\*\* · 권영철\*\*\*\*†

한양대학교 대학원, \*한국산업기술시험원, \*\*한양대학교 기계공학부, \*\*\*선문대학교 기계공학부  
(2007년 3월 20일 접수, 2007년 11월 20일 채택)

## Experimental Study on Characteristics of Evaporation Heat Transfer of CO<sub>2</sub> in a Smooth Tube

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

Department of Mechanical Engineering, 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 20 March 2007, Accepted 20 November 2007)

### 요 약

본 연구에서는 이산화탄소의 증발열전달 특성을 이해하기 위해 질량유속, 열유속 그리고 포화온도를 변화시키면서 이산화탄소의 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하였다. 질량유속과 열유속은 기존의 실험 범위보다 크게 확장하여 내경 7.75 mm, 길이 5.0 m의 수평관에서 실험하였다. 실험장치는 시험부, 전원 공급기, 히터, 칠러, 기어펌프, 유량계, 계측시스템 등으로 구성되었다. 전도가 증가할수록 증발 열전달계수는 감소하였으며, 이산화탄소의 증발 열전달계수는 질량유속보다 열유속에 더 민감함을 확인하였다. 또한 주어진 열유속과 포화온도에 따라 증발 열전달계수의 급격한 감소가 다르게 관찰되었다. 압력강하는 질량유속 증가에 대해 선형적인 증가를 보였지만 열유속 증가에 대한 압력강하의 증가효과가 크지 않았다.

**주요어** : 증발, 열전달, 이산화탄소, 평활관, 압력강하

**Abstract** — In order to investigate the heat transfer coefficient and pressure drop during evaporation of CO<sub>2</sub>, basic experiment on the evaporation heat transfer characteristics in a horizontal smooth tube was performed. The experimental 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/m<sup>2</sup>s), heat fluxes (10~80 kW/m<sup>2</sup>) and saturation temperatures (-5~5°C). With the increase of quality, the evaporation heat transfer coefficient decreased. With the increase of heat flux, the evaporation heat transfer coefficient increased. Significantly change of the heat transfer coefficient was observed at any heat flux and mass flux. With the increase of saturation temperature, the heat transfer coefficient increased. Pressure drop increased with the increase of mass flux and the decrease of saturation temperature.

**Key words** : Evaporation, Heat transfer, CO<sub>2</sub>, Smooth tube, Pressure drop

†To whom correspondence should be addressed.  
Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University, Chungnam 336-708, Korea  
Tel: 041-530-2396  
E-mail: yckweon1@sunmoon.ac.kr

### 1. 서 론

기존냉매의 환경문제로 최근 친환경적인 여러 대체냉매들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 이들 대체 냉매들 중 CO<sub>2</sub>는 천연냉매로서의 장점과 더불어 독성과 인화성이 없을 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 장점을 지니고 있으며, 또한 기존냉매에 비하여 단위체적당 냉각능력이 크고 응용온도 범위에서 압력비가 작으므로 냉매 사이클에 적용 시 보다 좋은 성능을 낼 수 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 CO<sub>2</sub>를 대체냉매로 적용한 냉동 사이클 개발에 대한 기초연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어 왔다<sup>[1][2]</sup>.

Zhao *et al.*<sup>[3]</sup>은 질량유속 100~350 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 10~20 kW/m<sup>2</sup> 그리고 Bredesen<sup>[4]</sup>은 질량유속 200~400 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 3~9 kW/m<sup>2</sup>인 실험범위에서 CO<sub>2</sub> 증발 열전달계수를 측정하여 기존냉매들의 열전달계수에 비해 월등히 높다고 확인하였다. Son<sup>[5]</sup>은 질량유속 200~500 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 10~40 kW/m<sup>2</sup>인 실험범위에서 CO<sub>2</sub>의 증발과 가스냉각 실험을 수행하여, 측정된 압력강하가 기존의 Choi<sup>[6]</sup> 상관식과 비교하여 약 14% 정도의 오차를 그리고 열전달계수는 Jung *et al.*<sup>[7]</sup>의 상관식과 비교하여 약 20% 이상의 오차를 확인하였다. Cho<sup>[8]</sup>는 질량유속 200~540 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 10~18 kW/m<sup>2</sup>인 실험범위에서 CO<sub>2</sub>의 증발열전달 특성을 연구하였다. 그는 벽면 과열도와 열전달계수의 관계 및 질량유속, 열유속, 포화온도의 변화에 따른 열전달 변화 특성에 대해 관찰하였으며, 또한 Gungor and Winterton<sup>[9]</sup> 상관식과 비교하여 실험데이터와 약 40% 이상 차이가 나는 것을 확인하였다.

앞서 제시된 여러 연구자들은 비교적 좁은 질량유속과 열유속 범위 내에서 CO<sub>2</sub>의 증발 열전달 연구를 수행하였다. 그러나 실제 공조기의 열교환기 설계 및 운전자료로 사용되기 위해서는 보다 넓은 실험범위에서의 CO<sub>2</sub> 열전달 특성을 조사할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 포화온도 -5, 0, 5°C 하에서 질량유속 200~1200 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 10~80 kW/m<sup>2</sup>의 확대범위에서 CO<sub>2</sub>의 증발 열전달 특성을 연구하였다.

### 2. 실험장치 및 실험조건

CO<sub>2</sub>의 증발 열전달 특성과 압력강하 특성을 확인하기 위한 실험장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다. CO<sub>2</sub>는 펌프에 의해 실험장치를 순환하며 CO<sub>2</sub>의 순환량은 주냉각기 후단에 설치된 질량유량계에서 측정하였다. 실험부의 입구조건을 만족하기 위해 부냉각기(sub-chiller)와 예열기(pre-heater)를 설치하였으며, 증발열전달계수

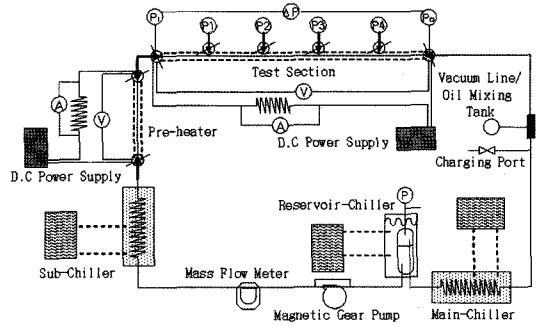


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

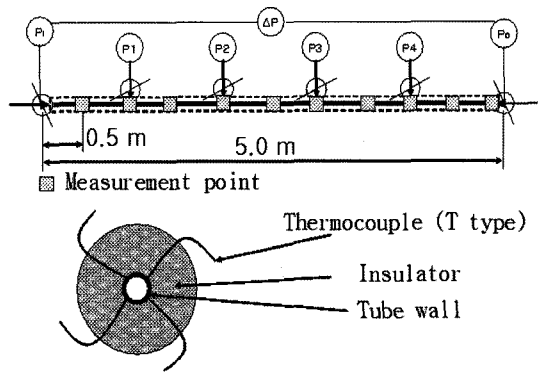


Fig. 2. Schematic diagram of the test section.

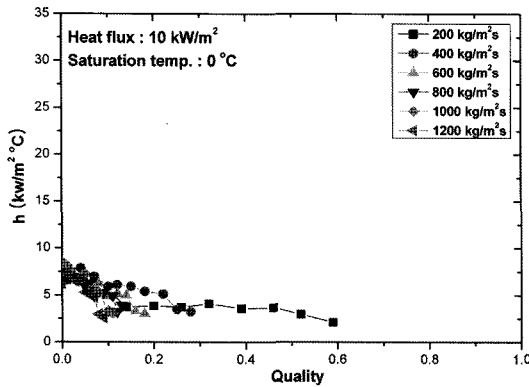
를 측정하기 위해 수평평활관의 외부에 열전대를 부착하였다. 또한, 증발 압력강하를 측정하기 위해 1m 간격으로 압력계를 설치하였다. 실험부에 직접 가열 방식으로 열량을 공급하기 위해 500 A, 30 V의 대용량 직류 전원 공급 장치를 설치하였으며, 실험부를 지난 이상상태의 CO<sub>2</sub>는 주냉각기(main chiller)에서 과냉각 상태로 환원된다.

Fig. 2에 도시한 실험부는 길이 5m의 평활관(smooth tube)이다. 포화온도를 결정하기 위한 국소 압력은 실험부에 1m 간격으로 설치된 압력센서에서 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 중심으로 네 곳에서 측정되었으며, 외부와의 열전달을 최소화하기 위해 단열재로 실험부 외부를 단열하였다.

CO<sub>2</sub>는 실험장치 내부를 진공한 후 충전하였고, 유입된 CO<sub>2</sub>는 주냉각기를 가동하여 안정시킨 다음, 입구온도 ±0.1°C 이내, 설정된 질량유량은 ±3% 이내로 일정

**Table 1. Experimental conditions.**

Tube I.D. [mm]	$T_{sat}$ [°C]	G [kg/m <sup>2</sup> s]	$q''$ [kW/m <sup>2</sup> ]
7.75	-5	200	10, 20
		400	10, 20, 30
	0	600	10, 20, 30
		800	10, 20, 30, 60
	5	1000	10, 20, 30, 60
		1200	10, 20, 30, 60, 80



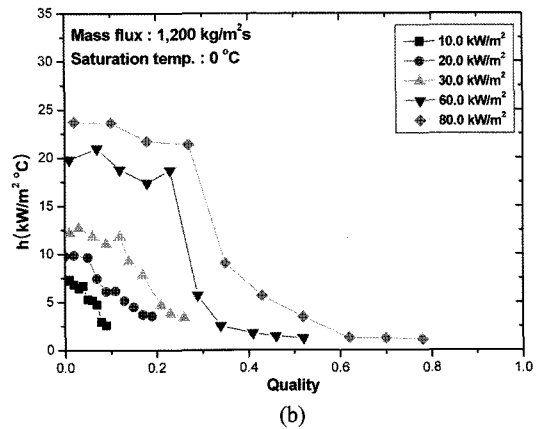
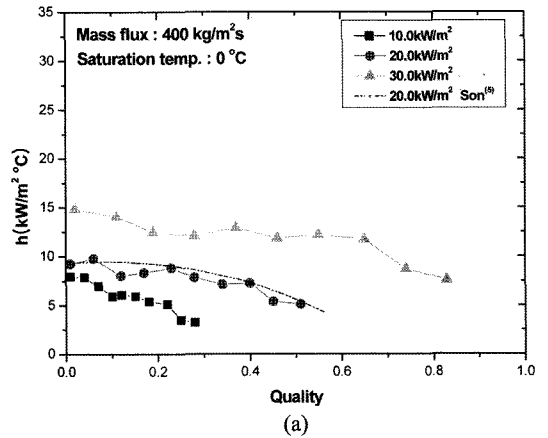
**Fig. 3. Variation of heat transfer coefficient on mass flux.**

할 경우 정상상태로 간주하고 정상상태 후 1시간 예비 운전을 통해 실험조건의 재현성을 확인하였다.

CO<sub>2</sub>의 물성계산은 NIST에서 개발한 냉매 물성계산 프로그램 REFPROP(Ver 6.01)<sup>10)</sup>를 사용하였다. 데이터는 정상상태에서 20분 동안 다채널 기록계로 GPIB 통신을 통해 컴퓨터에 기록된다. 실험부에서 측정된 4 지점의 외벽면 온도를 산술평균하여 증발 열전달계수를 산정하였다. Table 1은 실험조건을 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 질량유속 변화에 대한 CO<sub>2</sub> 증발 열전달계수를 나타낸다. 포화온도 0°C, 열유속 10 kW/m<sup>2</sup>, 질량유속 200~1,200 kg/m<sup>2</sup>s에서 질량유속을 200 kg/m<sup>2</sup>s씩 증가시키면서 관내 건도변화에 대한 CO<sub>2</sub> 증발 열전달계수의 변화를 조사하였다. 질량유속이 200 kg/m<sup>2</sup>s일 때 증발 열전달계수는 시험관 입구부근에서 최대값을 가지며 건도 0.6 부근까지 완만히 감소하였다. 이는 기·액 간의 밀도차의 감소로 인해 대류비동이 억제되고 핵비동이 지배적이기 때문이다. 그러나 질량유속이 600 kg/m<sup>2</sup>s 이상으로 증가하면 증발 열전달계수의 최대값이 시험관 입구 부근에서 발생 한 후 급격히 감소하였다. Fig. 3으



**Fig. 4. Variation of heat transfer coefficient on heat flux.**

로부터, 건도가 증가할수록 증발 열전달계수는 감소하며, 질량유속에 따라 증발 열전달계수의 분포가 다름을 알 수 있다. 그러나 질량유속의 증가에 따른 증발 열전달계수의 뚜렷한 증가는 관찰할 수 없었다.

Fig. 4는 열유속 변화에 대한 CO<sub>2</sub> 증발 열전달계수를 나타낸다. 포화온도 0°C, 질량유속 400, 1,200 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 10 kW/m<sup>2</sup>에서 10 kW/m<sup>2</sup>씩 증가시켜가면서 관내 건도변화에 대한 증발 열전달계수의 변화를 조사하였다. Fig. 4(a)는 질량유속 400 kg/m<sup>2</sup>s일 때 증발열전달계수의 분포로 열유속이 증가할수록 높은 증발 열전달계수를 보여준다. 열유속 20 kW/m<sup>2</sup>의 조건에서 Son<sup>⁽⁵⁾</sup>의 실험결과와 비교한 결과 증발 열전달계수가 10% 이내로 일치하였다. Fig. 4(b)는 질량유속 1,200 kg/m<sup>2</sup>s일 때 증발 열전달계수의 분포로 열유속이 10, 20, 30 kW/m<sup>2</sup>에서는 증발 열전달계수가 건도가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 열유속 60, 80 kW/m<sup>2</sup>에서는 건도 0.2 이상에서 열전달계수가 급격히 감소하는 드라이아웃 현상이 발생하

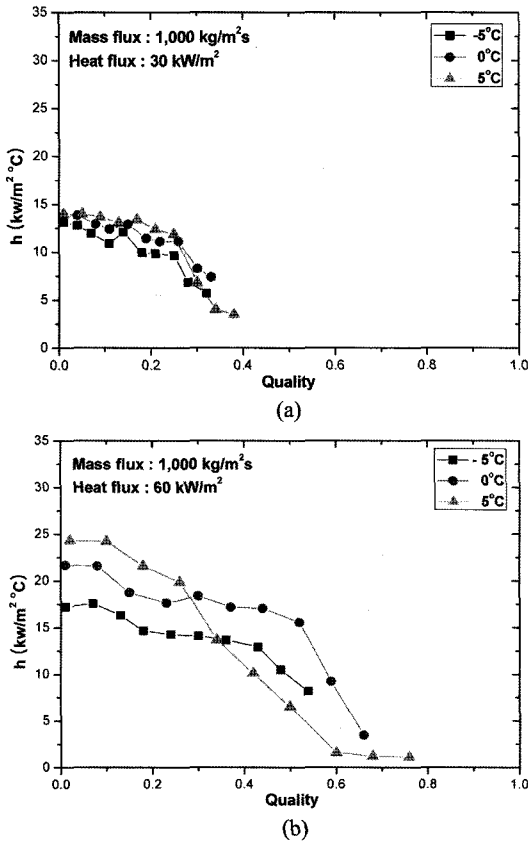


Fig. 5. Variation of heat transfer coefficient on saturation temperature.

였다. 이는 CO<sub>2</sub>가 아이계 영역에서 증발과정이 이루어 지므로 표면장력과 점성이 감소하여 관내 액막이 부분 적으로 파괴되기 때문이다.

Fig. 5는 포화온도 변화에 대한 CO<sub>2</sub> 증발 열전달계수를 나타낸다. 질량유속 1,000 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 30, 60 kW/m<sup>2</sup>, 포화온도 -5, 0, 5°C에서 관내 건도변화에 대한 증발 열전달계수의 변화를 조사하였다. Fig. 5(a)는 열유속 30 kW/m<sup>2</sup>일 때 증발 열전달계수의 분포로 포화온도가 증가할수록 증발 열전달계수가 증가하였다. 이는 포화온도 상승으로 인한 CO<sub>2</sub>의 점성과 표면장력의 감소로 기포 발생이 용이하여 핵비등 효과가 활발해졌기 때문이다. Fig. 5(b)는 열유속 60 kW/m<sup>2</sup>일 때 증발 열전달계수의 분포로 열유속이 증가할수록 포화온도 변화에 따른 증발 열전달계수 증가가 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 포화온도 5°C의 경우는 건도 0.3 부근에서 드라이아웃 현상이 관찰된 후에 급격한 감소를 보이고 있다. 이는 포화온도 상승으로 인해 CO<sub>2</sub> 표면장력의 감소와 중력의 영향으로 관 상부의 액막 파괴가 더욱 빨라졌기 때문이다. 포화

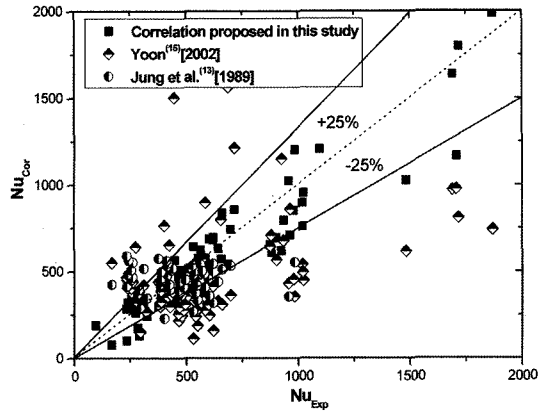


Fig. 6. Comparison on correlated Nusselt number with measured Nusselt number.

온도 0°C의 경우는 건도 0.6 부근에서 발생하였고 포화 온도 -5°C의 경우는 드라이아웃 현상이 관찰되지 않았다. 즉, 포화온도의 상승으로 상대적으로 높은 증발 열전달계수를 얻을 수 있다. 열유속 60 kW/m<sup>2</sup>, 건도 0.2의 조건에서 포화온도 0°C와 5°C일 때 열전달계수를 비교하면 열전달계수가 약 20% 이상 증가한다. 이로부터 증발기에서 포화온도를 상승시킬 경우에 동일 조건에서 에너지 절감효과를 예상할 수 있다.

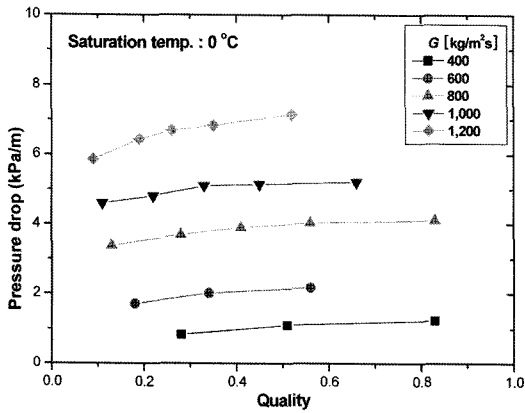
본 연구에서 획득한 열전달계수를 비교하기 위해 Jung et al.<sup>[7]</sup>과 Yoon<sup>[11]</sup>이 제안한 상관식을 이용하여 Fig. 6에 나타내었다. Jung 등과 Yoon에 의한 값들은 실험값에 비해 최대 ±60% 이상의 오차를 보였다. Jung 등의 상관식에 의한 값들은 저 Nu 수 범위에 걸쳐있으나 Yoon의 값들은 전 Nu 수 범위에 산포함을 알 수 있다. 따라서 본 실험으로부터 얻어진 실험값들로부터 다음과 같은 상관식을 도출하였다. 제안된 상관식은 전 실험범위 내에서 측정값들과 최대 ±30% 오차 내에서 일치하였다.

$$Nu_{2\phi} = \frac{h_{2\phi} D}{k_f} = C \cdot Re^{0.7} \cdot Bo^{0.8} \cdot Co^{0.4}$$

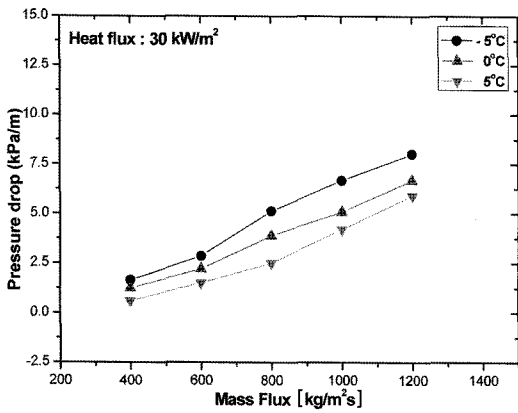
$$x_{out} < 0.3; C = 376$$

$$x_{out} \geq 0.3; C = 75 \cdot \left( -\ln \left( \frac{\left( x_1 - 0.3 \left( \frac{q''}{q_c''} \right)^2 \right)}{x_1} \right) \right) \quad (1)$$

질량유속과 열유속은 증발 열전달계수를 결정하는 중요한 변수들로, 이들 변수들이 열전달계수에 미치는 영향을 이해하고자 질량유속, 열유속에 대한 Nu 수의 변화를 알아보았다. 질량유속이 약 2배 증가하면 Nu 수는 약 8% 정도, 열유속이 약 2배 증가하면 Nu 수는 약 50%



(a)



(b)

Fig. 7. Variation of pressure drop on quality and mass flux.

이상 증가하게 된다. 이는 증발 열전달계수가 질량유속보다 열유속의 변화에 더 민감함을 보여주는 것이다. 또한 Yun<sup>[12]</sup>의 연구에서 질량유속 240 kg/m<sup>2</sup>s, 열유속 10 kW/m<sup>2</sup>, 포화온도 5°C의 조건에서 R-134a의 열전달계수는 3~5 kW/m<sup>2</sup>C로 측정되었는데 이는 동일 조건에서 측정된 CO<sub>2</sub>의 열전달계수의 약 63% 정도로 CO<sub>2</sub>의 열전달 성능이 기존냉매에 비해 우수함을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 포화온도 0°C에서 질량유속을 400, 600, 800, 1,000, 1,200 kg/m<sup>2</sup>s로 증가시킬 경우, 진도 변화에 대한 증발 압력강하를 나타낸다. 질량유속이 증가하면 높은 증발 압력강하가 나타나고, 진도가 증가하면 증발 압력강하는 증가하지만 그 효과는 적게 관찰되었다. Fig. 7(b)는 열유속 30 kW/m<sup>2</sup>인 경우의 질량유속 변화에 대한 증발 압력강하를 나타낸다. Fig. 7(a)의 경향처럼 질량유속이 증가하면 압력강하가 증가하는데 이는 질량유속 증가에 의한 벽면의 마찰력 증가에 의한 것으로 판

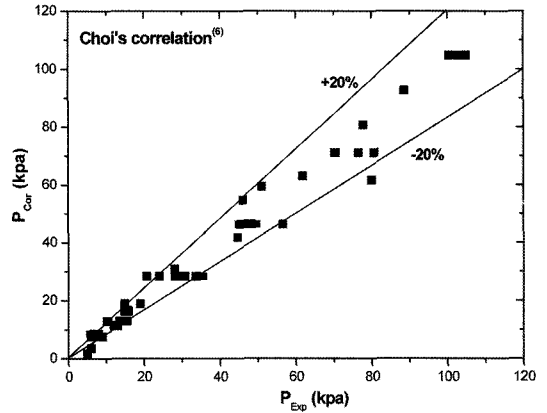


Fig. 8. Comparison of correlated pressure drop with experimental pressure drop.

단된다. 또한, 포화온도가 상승하면 압력강하가 감소하는데 이는 포화온도의 상승으로 CO<sub>2</sub>의 표면장력과 전단력이 감소하여 마찰 압력강하가 줄어들었기 때문이다.

Fig. 8은 측정된 CO<sub>2</sub> 압력강하를 Choi *et al.*<sup>[6]</sup>의 상관식과 비교한 결과로, ±25%의 오차 내에서 일치하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 질량유속, 열유속 그리고 포화온도를 변화시키면서 내경 7.75 mm, 길이 5.0 m인 수평 평활관에서 CO<sub>2</sub>의 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하여 다음의 결과를 얻었다.

진도가 증가할수록 증발 열전달계수는 감소하며, 질량유속에 따라 증발 열전달계수의 분포가 다름을 알 수 있다. 그러나 질량유속의 증가에 따른 증발 열전달계수의 뚜렷한 증가는 관찰할 수 없었다. 열유속이 증가할수록 높은 증발 열전달계수를 보여준다. 그러나 고열유속에서는 저 진도에서 열전달계수가 급격히 감소하는 드라이아웃 현상이 나타났다.

포화온도가 증가할수록 증발 열전달계수가 증가하였으며, 주어진 열유속과 포화온도에 따라 드라이아웃의 발생조건이 달라짐을 알 수 있었다. 제안된 상관식은 전 실험범위 내에서 측정값들과 최대 ±30% 오차 내에서 일치하였으며, 증발 열전달계수는 질량유속보다 열유속 변화에 더 민감함을 알 수 있었다.

질량유속이 증가하면 높은 증발 압력강하가 나타나고, 진도가 증가하면 증발 압력강하는 증가하지만 그 효과는 적게 관찰되었다. 측정된 CO<sub>2</sub> 압력강하는 Choi 등의 상관식과 약 ±25%의 오차 내에서 일치하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 차세대 신기술 개발 사업 중 '환경친화적 자연 냉매인 CO<sub>2</sub>를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발' 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 기호설명

Bo	: Boiling수 [=q"/Gi <sub>b</sub> ]
C	: 상관식 상수 [-]
Co	: Convection수 [=((1-x <sub>i</sub> )/x <sub>i</sub> ) <sup>0.8</sup> (ρ <sub>v</sub> /ρ <sub>l</sub> ) <sup>0.5</sup> ]
G	: 질량유속 [kg/m <sup>2</sup> s]
h	: 열전달계수 [W/m <sup>2</sup> °C]
Nu	: Nusselt수 [=h <sub>20</sub> D/k <sub>f</sub> ]
Re	: Reynolds수 [=GD <sub>f</sub> /μ]
q"	: 열유속 [kW/m <sup>2</sup> ]
x	: 건도 [-]

## 하첨자

2Φ	: 이상상태
c	: 압계점
f	: 액체
i	: 위치, 내경
out	: 출구
v	: 기체

## 참고문헌

- Lorentzen, G.; Pettersen, J. A new efficient and environmentally benign system for car air-conditioning, *International Journal Refrigeration*, 1992, 16(1), 4-12.
- Lorentzen, G. The use of natural refrigerants: a complete solution to the CFC/HCFC predicament, *International Journal Refrigeration*, 1995, 18(3), 190-197.
- Zhao, Y.; Ohadi, M.M.; Dessiatoun, S.V.; Schuster, A.; McNair, A.; Radermacher, R.; Darabi, J. Evaporation heat transfer coefficients of ammonia and CO<sub>2</sub> inside a smooth tube, IIF-IIR Commission B1, with E1&E2, College Park, MD, 1997, 116-130.
- Bredesen, A.; Hafner, A.; Pettersen, J.; Aflekt, K. Heat transfer and pressure drop for in-tube evaporation of CO<sub>2</sub>, international conference on heat transfer issues in natural refrigerants, College Park, MD, 1997, 1-15.
- Son, C.H. Heat transfer characteristics of supercritical cycle of carbon dioxide in a horizontal tube, Ph.D. Thesis, Pukyong National University, Pusan, Korea, 2004.
- Choi, J.Y.; Kedzierski, A.M.; Domanski, A.P. A generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth tube and micro-fin tube, NISTIR 6333, 1999, 7-15.
- Jung, D.S.; McLinden, M.; Radermacher, R.; Didion, D. A study of flow boiling heat transfer with refrigerants mixtures, *Int. Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(9), 1751-1764.
- Cho, Y.S. An experimental study on the characteristics of evaporative heat transfer of carbon dioxide, M.S. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 2000.
- Gungor, K.E.; Winterton, R.H.S. Simplified general correlation for flow saturated boiling and comparisons of correlations with data, *Chem. Eng. Res. Des.*, 1987, 65, 148-156.
- McLinden, M.O.; Klein, S.A.; Lemmon, E.W.; Peskin, A.P. NIST thermodynamic properties and refrigerant mixtures database (REFPROP), Version 6.01, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A, 1998.
- Yoon, S.H. Studies on the characteristics of evaporation and supercritical gas cooling heat transfer of carbon dioxide, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 2002.
- Yun, L. Convective boiling of carbon dioxide in mini tubes and micro-channels, Ph.D. Thesis, Korea University, Seoul, Korea, 2003.