

PAG 오일이 CO₂ 증발열전달에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

이 상 재, 김 대 훈, 최 준 영*, 이 재 현**, 권 영 철****

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

Experimental Study on Effects of PAG Oil for CO₂ Evaporation Heat Transfer

Sang-Jae Lee, Dae-Hoon Kim, Jun-Young Choi*, Jae-Heon Lee**, 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 November 7, 2007; revision received April 23, 2008)

ABSTRACT: In order to investigate CO₂ heat transfer coefficient and pressure drop by PAG oil concentration during CO₂ evaporation, the experiment on evaporation heat transfer characteristics in a horizontal micro-fin 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(400~1200 kg/m²s), heat fluxes(10~30 kW/m²) and saturation temperatures (-5~5°C), and PAG oil concentration(0~5 wt%). The variation of the heat transfer coefficient was different in accordance with the oil concentration. With the increase of the oil concentration, the evaporation heat transfer coefficient decreased and the delay of dryout by oil addition was found. Pressure drop increased with the increase of the oil concentration and heat flux, and the decrease of saturation temperature.

Key words: CO₂(이산화탄소), Evaporation heat transfer(증발열전달), Oil effect(오일영향), Pressure drop(압력강하)

기 호 설 명

하첨자

D	: 관지름 [m]	$conc$: 오일첨가량
G	: 질량유속 [kg/(m ² s)]	i	: 내부
h	: 열전달계수 [kW/(m ² °C)]	o	: 외부
k	: 열전도도 [W/mK]	sat	: 포화온도
q''	: 열유속 [W/m ²]	w	: 벽
T	: 온도 [°C]		
X	: 건도 [-]		

† Corresponding author

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

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

1. 서 론

지구온난화와 오존층 파괴를 방지하기 위한 연

구의 일환으로 친환경적으로 우수한 자연냉매인 CO₂에 대한 연구가 Lorentzen and Pettersen⁽¹⁾에 의해 발표되고 난 이후에 국내외적으로 큰 관심을 보이며 최근 들어 많은 연구가 진행되고 있다. 대채냉매 또는 자연냉매를 냉동·공조 시스템에 적용할 경우에 시스템의 운전 및 성능특성은 냉매에 따라 다르게 나타난다. 또한 압축기 내에 주입된 오일농도에 따라서도 시스템의 성능은 달라지므로, CO₂를 냉동·공조 시스템에 적용하기 위해서는 먼저 CO₂의 열전달 특성연구와 아울러 CO₂와 압축기 내 오일의 혼합에 따른 압력강하와 열전달 특성을 이해하여야 한다.

냉매와 오일농도에 대한 기존연구는 다음과 같다. Cho and Tae⁽²⁾은 마이크로핀관을 통해 R-22와 R-407C를 이용하여 오일농도에 따른 열전달계수의 영향을 조사하였으며, 열전달계수의 감소율은 입구건도가 크고, 질량유속과 열유속이 적을수록 컸다고 보고하였다.

Bae et al.⁽³⁾은 마이크로핀관 내 R-134a 증발열전달계수와 유동양식에 미치는 PAG 오일농도의 정성적인 영향에 대해 실험적으로 검토, 분석하였다. 열전달계수는 오일농도 3 wt% 정도까지 순수 냉매와 동일한 경향을 나타내며, 5 wt% 이상에서는 평균 열전달계수가 순수냉매보다 작게 나타났다고 보고하였다. Lim et al.⁽⁴⁾은 원형관내에서 CO₂ 냉매와 오일 혼합물의 압력강하 및 열전달 실험을 통해 오일농도가 증가함에 따라 냉매와 오일 혼합물의 점성저항이 증가하여 압력강하가 크게 나타났으며, 비열과 열확산계수가 감소하여 열전달계수가 감소한다고 밝혔다. 앞에서 살펴본 것처럼, 관내 CO₂에 의한 오일영향의 연구는 부족한 실정이다.

CO₂에 적합한 오일선정을 위해 오일특성과 상용성 및 압축기 마모성에 대한 연구결과를 보면, Seeton et al.⁽⁵⁾은 PAO, AB, PAG 및 POE 오일혼합물의 윤활성능을 비교하여 PAG가 가장 뛰어나다고 보고하고 있다. 또한 Kim⁽⁶⁾은 POE와 PAG 오일의 미끄럼 실험에서 POE 오일보다 PAG 오일이 마멸량이 적게 측정되어 압축기의 내마멸성을 향상한다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 PAG 오일이 마이크로핀관 내에서 CO₂ 증발열전달과 압력강하에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고자 하였다. 내경 6.16 mm인 마이크로핀관을 이용하여 3가지 PAG 오일 질량농도에서 CO₂ 질량유속과 열유속 그리고 포화온도를 변화시키면서 PAG 오일에 의한 CO₂ 증발열전달의 특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

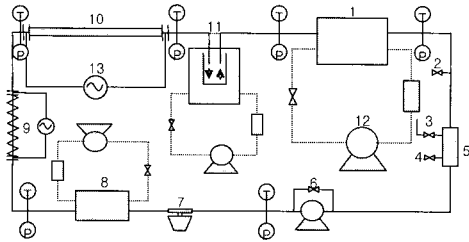
2.1 실험장치

CO₂ 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. CO₂는 순환용 기어펌프에 의해 순환되고 질량유량계에 의해 밀도와 유량이 측정된다. 실험부의 입구조건을 만족하기 위해 부냉각기와 예열기를 실험부 전단에 설치하였다. 실험부의 온도와 압력을 측정하기 위해 열전대와 압력계를 설치하였고, 실험부에 열량을 공급하기 위해 직접 가열 방식을 채택하였으며, 실험부를 통과한 이상상태(two-phase)의 CO₂는 주냉각기에서 과냉각 상태로 환원되게 구성하였다. 과냉각 상태의 CO₂와 PAG 오일을 혼합하기 위한 혼합탱크(oil mixing tank)를 두어 질량비에 맞게 오일량을 조절하여 삽입할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 길이 5m로 제작된 마이크로핀관 실험부의 내벽면을 나타낸다. 내경 6.16 mm인 마이크로핀관은 내벽에 60개의 홈을 갖고 있으며, 핀각은 53°이고, 관벽 두께는 0.32 mm이다. 마이크로핀관의 길이에 따른 외벽면 온도 측정을 위한 T형 열전대는 실험부 입구를 기준으로 0.5 m 간격으로 관 외벽에 10지점에 부착되었으며, 이때 한 지점에서의 온도는 관의 원주방향으로 90°의 각도를 가지고 네 곳에서 측정된다. 또한, 국부의 포화압력을 측정하기 위하여 1m간격으로 관벽에 1mm의 홀을 가공하였다. 외부와의 열전달을 최소화하기 위해 단열재로 실험부 외부를 단열하였다.

2.2 실험방법 및 조건

CO₂는 고압에서 작동함에 따라 우선 실험장치의 기밀성을 확인한 후, 진공펌프를 이용하여 실험장치 내부를 진공한 다음 CO₂를 충전하였다. 또한 오일농도는 혼합탱크에서 충전 CO₂ 질량에 비례하여 조절되었다. 실험부의 교체나 충전된 CO₂ 교체 시 오일농도변화를 방지하기 위해서 오일세척을 반복 실시하였다. 오일세척은 우선 실험장비를 구간별로 나누어 질소와 아세톤, 그리고 CO₂를 이용하였으며, 진공펌프에 의해 강제적으로 관벽에 유착되어 있는 것을 세척하여 잔류오일의 양을 최소화하고자 하였다. 특히 순환 펌프 내의 기어부에 잔류하는 오일을 제거하기 위해 직접 분해



1. main chiller 2. charge port 3. oil charge port 4. vacuum line
5. mixing tank 6. magnetic pump 7. mass flow meter 8. sub- chiller
9. pre-heater 10. test section 11. reserved tank 12. refrigerator
13. DC power supply

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

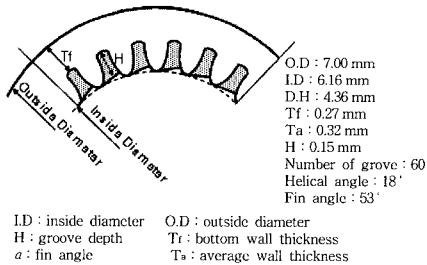
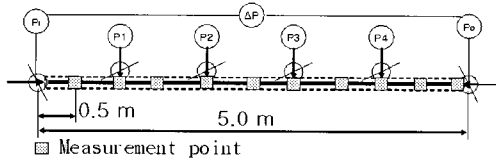


Fig. 2 Schematic diagram of test section and micro-fin tube.

하여 오일을 제거하기도 하였다.

CO₂가 실험부를 순환하면서 입구온도와 질량유량이 설정치의 ±0.1 °C, ±3% 이내를 각각 만족하면 정상상태로 간주하여 실험을 수행하였다. 측정된 데이터는 정상상태에서 10분 동안 다채널 기록계와 GPIB 통신을 통해 저장된다. 실험부의 길이방향으로 국소 외벽면 온도는 동일위치에서 측정된 4지점의 외벽면 온도를 산술평균하여 산정하

Table 1 Experimental conditions

I.D. [mm]	G_2 [kg/m ² s]	T_{sat} [°C]	q'' [kW/m ²]	O_{conc} (% mass)
6.16	400	-5	10	0
	600	0	20	1
	800	5	30	3
	1200	5	30	5

였다. Table 1은 질량유속, 열유속, 포화온도, 그리고 오일농도에 대한 실험조건을 나타낸다.

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

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

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

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

실험에서 획득한 온도 데이터는 식(2)를 이용하여 내벽면 온도를 계산하고 식(1)에서 인가된 열유속과 CO₂의 내벽면 온도차로 국소 열전달계수를 산정하였다.

마이크로핀관의 경우에 관내 형상에 따라 특성 길이가 서로 상이함에 따라 관내 형상의 상대적인 비교를 위하여 Choi et al.⁽⁷⁾이 제시한 방법을 이용하여 마이크로핀관의 수력직경을 계산하였으며, 본 연구에 사용된 마이크로핀관의 수력직경은 4.36 mm이다. 실험데이터의 오차분석을 통해 온도, 열전달계수, 압력강하의 최대오차범위는 각각 ±8.0%, ±10.2%, ±1.2% 이내로 그리고 오일농도는 ±2.9% 이내로 평가되었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 열유속과 PAG 오일농도 변화에 대한 CO₂ 증발 열전달계수를 나타낸다. 시험관 입구조건을 포화상태로 유입시켜 포화온도는 5 °C, 질량유속은 800 kg/m²s의 조건하에서 열유속(10, 20, 30 kW/m²)과 오일농도(0, 3, 5 wt%) 변화에 따라 CO₂ 증발 열전달계수를 조사하였다. Fig. 3(a)는 PAG 오일을 첨가하지 않은 경우로, 열유속 변화에 따라 증발 열전달계수의 분포가 뚜렷한 차이를 나타낸다. 또한, 열유속이 20 kW/m²일 때 건도가 증가할수록 증발 열전달계수는 점차 감소하는 CO₂의 증발 특성을 잘 보이고 있다. 열유속이 30 kW/m²일 때 건도 0.3부근에서 드라이아웃 현상이 관찰되었다. Fig. 3(b)는 오일농도가 3, 5 wt%일 경우로, 열유속이 증가할수록 증발 열전달계수가 증가하지만 오일을 첨가하지 않은 경우(Fig. 3(a))에 비

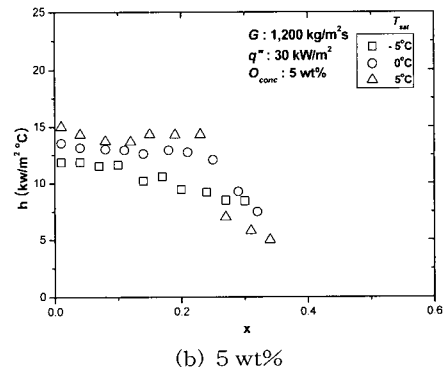
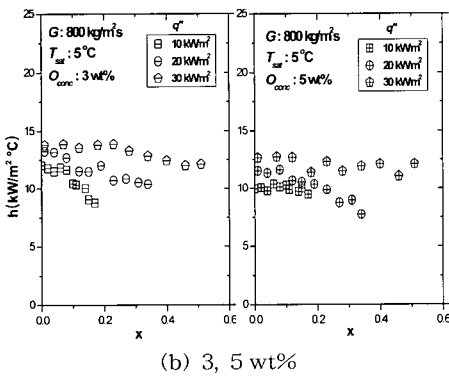
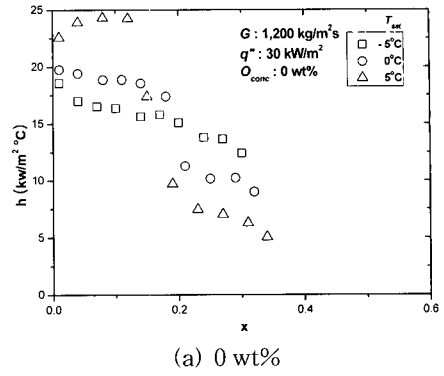
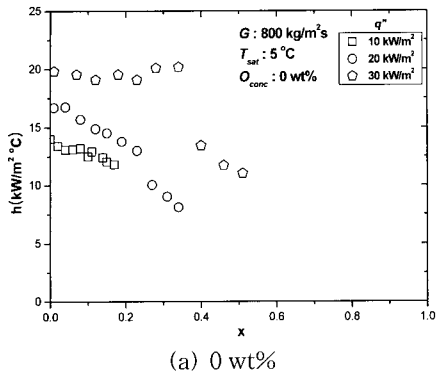


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficient with respect to quality on heat flux and oil concentration.

Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient with respect to quality on saturation temperature and oil concentration.

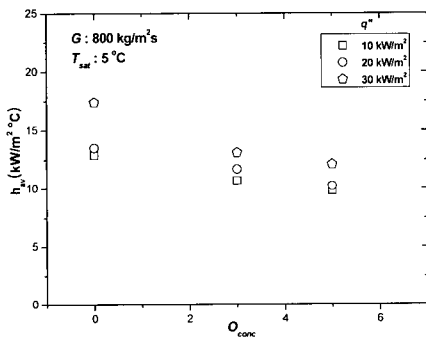


Fig. 4 Variation of the average heat transfer coefficient with respect to oil concentration on heat flux.

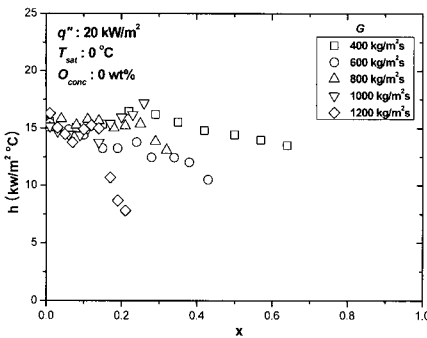
해 열유속 변화에 따른 증발 열전달계수의 분포는 뚜렷하지 않다. 이는 오일 첨가로 인해 관 내벽에 오일막을 형성하여 열유속의 영향을 감소시켰기 때문이다.⁽⁴⁾ 또한 드라이아웃 현상이 발생하지 않았는데 이는 오일농도 5 wt%에서 관벽과 CO₂ 사

이에 오일막이 형성되어 관벽의 젖음성을 유지하는 것으로 판단된다.

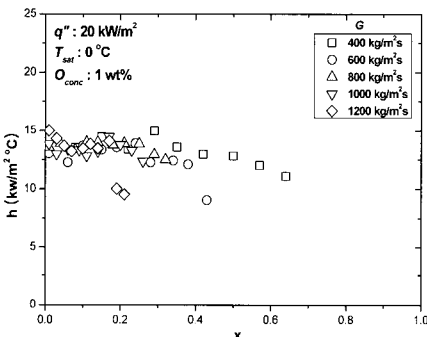
이러한 오일농도의 영향을 관찰하기 위해 Fig. 3의 입구 조건과 동일하게 하여 Fig. 4에 오일농도 변화에 대한 평균 열전달계수 변화를 나타내었다. 모든 열유속 조건(10~30 kW/m²)에서 오일농도가 증가할수록 평균 열전달계수가 감소하며 감소폭은 열유속이 클수록 크게 나타났다. 오일을 첨가하지 않은 경우에 비해 오일농도 5 wt%, 열유속 30 kW/m²에서 평균 열전달계수가 약 30%까지 감소함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 포화온도와 PAG 오일농도 변화에 대한 CO₂ 증발 열전달계수를 나타낸다. 시험관 입구 조건을 포화상태로 유입시켜 포화온도 -5, 0, 5 °C에서 질량유속은 1,200 kg/m²s, 열유속은 30 kW/m² 하에서 관내 건도변화에 대한 증발 열전달계수의 변화와 오일농도(5 wt%)에 대한 영향을 조사하였다.

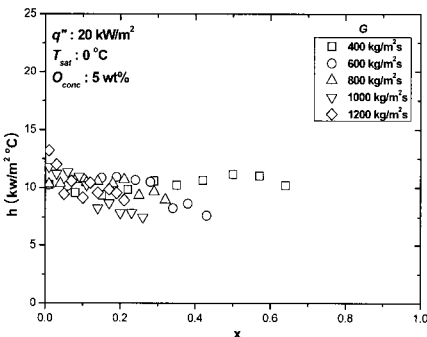
Fig. 5(a)는 PAG 오일을 첨가하지 않은 경우에 증발 열전달계수의 분포를 보여준다. 포화온도가



(a) 0 wt%



(b) 1 wt%



(c) 5 wt%

Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient with respect to quality on mass flux and oil concentration.

증가할수록, 드라이아웃 현상이 발생하지 않는 건도 범위 내에서 증발 열전달계수는 향상되었다. 이는 포화온도 상승으로 인한 CO₂의 점성과 표면장력의 감소로 기포발생이 용이하여 핵비등 효과가 활발해졌기 때문으로, 주어진 열유속과 포화온도에 따라 드라이아웃의 발생건도가 달라짐을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 오일의 농도가 5 wt%일 때 포화온도 변화에 대한 증발 열전달계수의 분포로

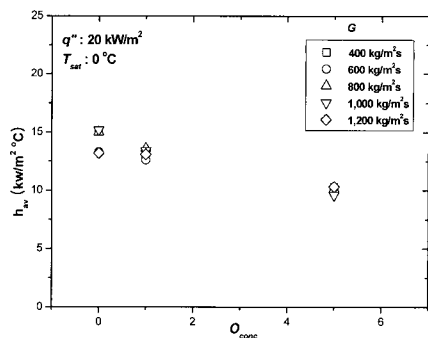


Fig. 7 Variation of the average heat transfer coefficient with respect to oil concentration on mass flux.

Table 2 Variation of the average heat transfer coefficient with oil concentration

O_{conc}	G	T_{sat}	q''
1	2~13%	6~15%	5~14%
3	15~23%	13~24%	17~25%
5	22~37%	21~33%	23~31%

Fig. 5(a)와는 달리 열전달계수의 변동범위가 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 또한 포화온도 5 °C에서는 드라이아웃의 발생건도가 지연됨을 보여주며, 이는 관 상부의 액막이 파괴되는 것을 오일막이 억제하기 때문으로 판단된다. 또한, 오일 첨가에 의한 열전달계수의 감소현상은 드라이아웃 발생 전 건도영역에서 보다 크게 나타남을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 질량유속과 PAG 오일농도 변화에 대한 CO₂ 증발 열전달계수의 거동을 나타낸다.

시험관 입구조건을 포화상태로 유입시켜 포화온도는 0 °C, 열유속은 20 kW/m²에서 질량유속 400~1,200 kg/m²s 범위 내에서 200 kg/m²s씩 증가하면서 오일농도(0, 1, 5 wt%)에 대한 CO₂ 증발 열전달계수를 조사하였다. Fig. 6(a)는 PAG 오일을 첨가하지 않았을 때의 질량유속 변화에 따른 증발 열전달계수를 나타낸다. 질량유속 증가에 따라 증발 열전달계수 분포가 일정한 열전달계수의 영역에서 밀집되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 질량유속이 열전달에 미치는 영향이 적다는 것을 의미한다. 특히, 1,200 kg/m²s에서는 건도 0.1에서 열전달계수가 급격히 감소하는 경향을 나타내는데 이는 드라이아웃 현상이 발생하였음을 보여준다. Fig.

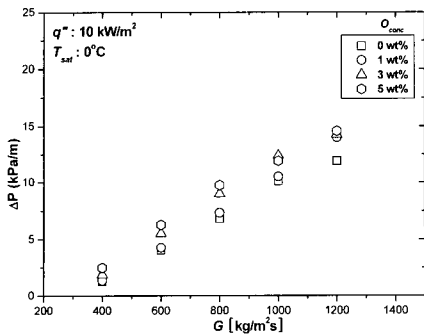


Fig. 8 Variation of pressure drop with respect to mass flux on oil concentration.

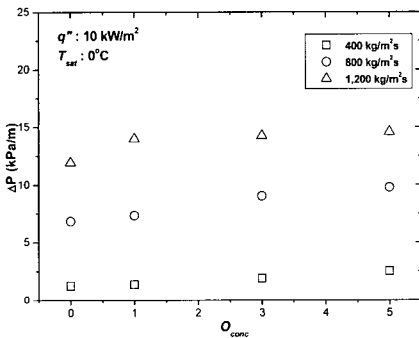


Fig. 9 Variation of pressure drop with respect to oil concentration on mass flux.

6(b)는 PAG 오일을 질량유속 대비 1 wt%를 첨가하였을 때의 증발 열전달계수로 PAG 오일을 첨가하지 않았을 때(Fig. 6(a))와 유사한 분포 경향을 보여주고 있으나, 전체적으로 열전달계수는 다소 낮아졌음을 알 수 있다. Fig. 6(c)는 PAG 오일을 질량 대비 5 wt%를 첨가하였을 때의 증발 열전달계수로, 오일농도 1 wt%의 증발 열전달계수보다 낮다. 또한 PAG 오일을 첨가하지 않았을 때, 질량유속 1,200 kg/m²s에서 관찰된 드라이아웃 현상이 나타나지 않았다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건으로 오일농도 변화에 따른 평균 열전달계수를 나타내었다. 오일농도가 증가할수록 평균 열전달계수의 변화폭이 감소하는 것으로 보아 오일 첨가에 의해 열전달계수에 미치는 질량유속의 영향이 감소하는 것을 알 수 있었다.

Table 2는 오일농도 변화에 따른 평균 열전달계수의 변화를 질량유속, 포화온도, 열유속으로 구분하여 나타내었다. 실험범위 내(질량유속; 400~1,200

kg/m²s, 포화온도; 0~5 °C, 열유속; 10~30 kW/m²)에서 오일농도가 증가할수록 평균 열전달계수는 감소하고 최대 감소량은 오일농도 5 wt%에서 약 30% 내외임을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 시험관 입구조건을 포화상태로 유입시켜 포화온도는 0 °C, 열유속은 10 kW/m²에서 오일의 농도를 0, 1, 3, 5 wt%로 증가시키는 경우, 질량유속 변화에 대한 압력강하를 나타낸다. 질량유속이 증가하면 압력강하는 거의 선형적으로 증가하고, 오일농도가 증가하면 압력강하도 증가하지만 그 효과는 작게 관찰되었다. 오일농도의 증가는 관내벽에 오일막을 형성하기 때문에 오일점성에 의한 마찰력의 증가로 압력강하가 상승하는 것이다.

Fig. 9는 오일농도 변화에 대한 압력강하를 나타내었다. 오일을 첨가하지 않은 경우에 비해 오일을 첨가한 경우가 높게 측정되었으며, 오일농도가 증가함에 따라 압력강하 변화폭은 작게 나타났다. 질량유속이 빠르고 오일농도가 1 wt%일 때 변화폭이 크게 관찰되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 PAG 오일농도에 따른 CO₂ 증발 열전달 변화를 조사하기 위하여 내경 6.16 mm, 길이 5.0 m인 마이크로관판에서 열유속, 포화온도, 질량유속을 변화시키면서 실험을 수행하여, 다음의 결과를 얻었다.

(1) 오일농도가 증가할수록 CO₂ 증발 열전달계수는 감소하였고, 열유속, 포화온도 그리고 질량유속 변화에 따른 열전달계수 감소는 오일농도 5 wt%에서 최대 약 30% 이내이었다.

(2) 열유속 변화에 따른 열전달계수의 변화는 오일농도에 따라 다르다. 오일이 없는 경우와는 달리 오일농도가 증가할수록 열유속 변화에 따른 증발 열전달계수의 분포는 뚜렷하지 않으며, 드라이아웃 현상도 발생하지 않았다.

(3) 포화온도가 증가할수록 열전달계수는 향상되었고 드라이아웃의 발생 건도도 달라졌다. 오일이 없는 경우에 비해 오일농도 5 wt%에서 포화온도에 따른 열전달계수의 변동폭이 크게 줄었다. 그리고 포화온도 5 °C에서 드라이아웃의 발생 위치가 지연되었다.

(4) 질량유속에 따른 증발 열전달효과는 열유속과 포화온도보다 적은 영향을 보였다. 한편 오일이 없는 경우의 질량유속 1,200 kg/m²s에서 관찰된 드

라이아웃 현상은 오일농도 3 wt%에서 0.1에서 0.2로 지연되었고 오일농도 5 wt%에서는 관찰되지 않았다.

(5) CO₂ 압력강하는 질량유속과 열유속이 증가할수록, 포화온도가 감소할수록 거의 선형적으로 증가하였고, 오일농도 변화에 따른 압력강하는 질량유속이 빠르고 오일농도가 1 wt%일 때 변화폭이 크게 관찰되었다.

후 기

본 논문은 지식경제부 차세대 신기술 개발사업의 지원에 의해 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분들께 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. Cho, K.N. and Tae, S.J., 1999, Effect of refrigeration lubricants on the heat transfer performance in the micro-fin tube evaporator, *SAREX*, Vol. 11, No. 1, pp. 61-72.
3. Bae, S.C., Kang, T.W., Kim, J.H., Jung, C.Y. and Kim J.S., 1997, Influence of refrigeration oil on evaporation heat transfer of R-134a in a horizontal micro-fin tube, *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* Vol. 5, No. 1, pp. 45-56.
4. Lim, D.S., Kang, B.H. and Park, K.K., 2005, An experimental study on pressure drop and heat transfer of CO₂/oil mixtures in a circular tube, *Proceeding of SAREK*, pp. 380-385.
5. Seeton, C., Fahl, J. and Henderson, D., 2000, Solubility, viscosity boundary lubrication and miscibility of CO₂ and synthetic lubricants, *Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*, Purdue, USA, pp. 417-424.
6. Kim, C.W., 2003, Development of CO₂ refrigerant with high efficiency compressor, Report of Samsung Electronics Co. LTD.
7. Choi, J.Y., Kedzierski, M. A. and Domanski, P.A., 1999, A generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth and micro-fin tubes, *NISTIR 6333*.