

마이크로핀관 내 CO₂의 증발 열전달과 오일 영향에 관한 실험적 연구

이 상 재, 최 준 영*, 이 재 현**, 권 영 철****

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

Experimental Study on Evaporation Heat Transfer and Oil Effect in Micro-fin Tube Using CO₂

Sang-Jae Lee, 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 March 22, 2007; revision received December 7, 2007)

ABSTRACT: In this paper, the experimental results on evaporation heat transfer characteristics were reported for a micro-fin tube using CO₂. An experimental refrigerant loop had been established to measure the evaporation heat transfer coefficient and pressure drop of CO₂. Experiments were conducted for mass fluxes, heat fluxes, saturation temperatures and PAG oil concentrations. With increasing the heat flux and the saturation temperature, the evaporation heat transfer coefficient increased. At the higher mass flux, however, the exit vapor quality of the micro-fin tube was to be lower. The peak of the heat transfer coefficient was shifted toward low quality region. The evaporation pressure drop increased as the mass flux increased and the saturation temperature decreased. As PAG oil concentration increased, the evaporation heat transfer coefficient decreased and the dryout was delayed by oil addition.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Evaporation heat transfer(증발열전달), Oil effect(오일 영향), Micro-fin tube(마이크로핀관), Dryout(드라이아웃)

기 호 설 명

A : 면적 [m²]
 D : 관지름 [m]
 G : 질량유속 [kg/(m²s)]
 h : 열전달계수 [kW/(m²°C)]
 i : 엔탈피 [kJ/kg]
 k : 열전도도 [kW/(m°C)]

L : 관 길이 [m]
 T : 온도 [°C]
 n : 핀 개수
 Sp : 핀과 핀 사이의 종횡거리 [m]
 x : 건도 [-]
 Q : 열량 [kW]
 q'' : 열유속 [W/m²]

† Corresponding author

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

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

하첨자

fg : 잠열

- i* : 관 내벽
- o* : 관 외벽
- 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 대체 냉매에 대한 연구가 활발하다. 대체 냉매들 중에 CO₂는 천연 냉매로서의 장점과 더불어 기존 냉매에 비하여 단위체적당 냉각능력이 크고 응용온도 범위에서 압력비가 작으므로 냉매 사이클에 적용 시 보다 좋은 성능을 낼 수 있다. CO₂는 냉매 특성상 초임계 사이클로 구현되므로 낮은 기계적 효율과 높은 작동압력을 가진다. 따라서 CO₂용 냉동공조기의 효율 증대를 위해 다양한 전열관에 대한 연구가 진행되고 있다. CO₂는 R-22와 R-134a에 비해 우수한 열전달 특성으로 낮은 점성과 높은 기체 밀도를 가지고 있어, 이러한 특성을 극대화한다면 열교환기의 크기와 무게를 줄일 수 있어 사이클의 소형화가 가능하다.⁽¹⁻⁵⁾

Schlager et al.⁽⁶⁾은 R-22를 작동유체로 하여 응축과 증발 열전달계수가 마이크로핀관의 경우 평활관에 비해 1.5~2.0배로 크게 나타났으며 압력 손실은 그다지 크지 않다고 하였다. Kattan et al.⁽⁷⁾은 R-134a와 R-123을 대상으로 수평관과 수직관에 대한 실험을 실시하여 마이크로핀관의 열전달 효과가 주로 환상유동 형태에 의한 관 벽의 젖음성(wetting)의 증가에 의한 것이라고 보고하였다. Kim et al.⁽⁸⁾은 CO₂를 이용하여 외경 9.52 mm의 마이크로핀관과 평활관의 증발 열전달 특성을 향상계수와 손실계수로 표현하였다. 향상계수는 1.5~2.0의 범위이고 손실계수는 1.2~1.5의 범위이므로 마이크로핀관에 의한 열전달 촉진에 비해 압력강하의 영향이 적음을 보였다.

Cho et al.⁽⁹⁾은 마이크로핀관 전열 성능에 미치는 오일 영향을 조사하기 위하여 오일농도에 따른 열전달계수의 영향을 조사하였다. 그리고 열전달계수의 감소율은 입구 건도가 크고, 질량유속과 열유속이 적을수록 컸다고 보고하였다. Bae et al.⁽¹⁰⁾은 7.00 mm 마이크로핀관 내 R-134a 증발열전달계수와 유동양식에 미치는 PAG 오일농도의 정성적인 영향에 대해 실험적으로 검토, 분석하였다. 열전달계수는 오일농도 3wt.% 정도까지 순수 냉매와 동일한 경향을 나타내며, 5wt.% 이상에서는 평균 열전달계수가 순수 냉매보다 작

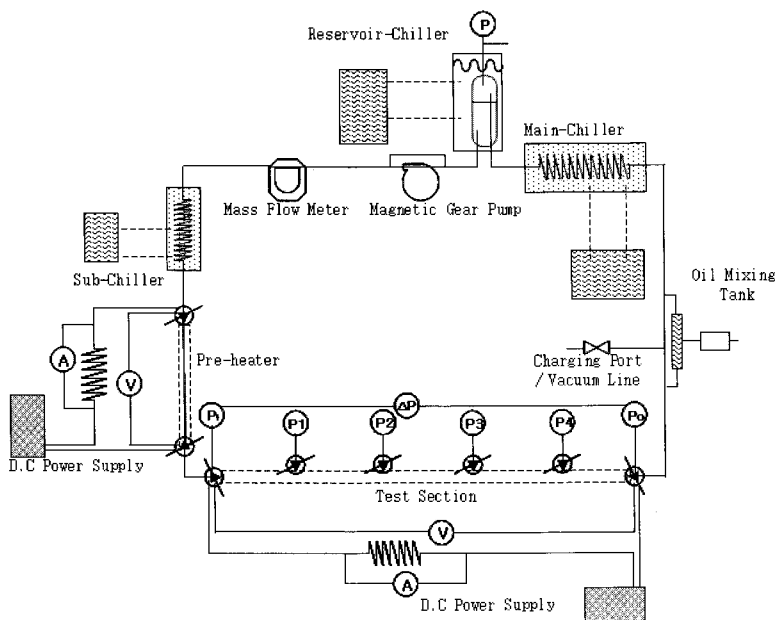


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

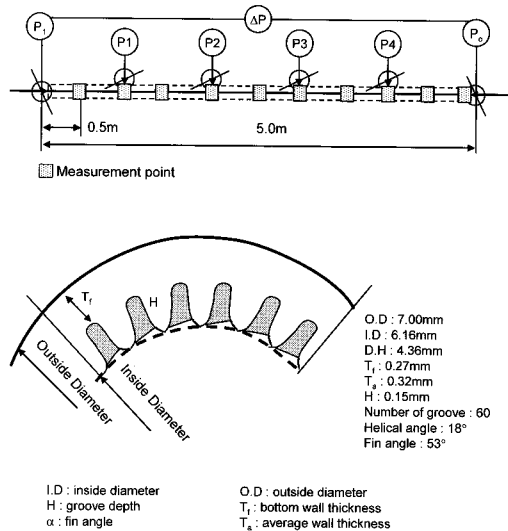


Fig. 2 Schematic diagram of test section and micro-fin tube.

게 나타났다고 제시하였다.

이에 본 연구에서는 외경 7.00 mm인 마이크로핀관을 이용하여 CO₂ 증발 열전달 특성을 조사하고자 기존 연구보다 광범위한 질량유속 범위에서 열유속과 포화온도를 변화시키면서 증발 열전달 계수와 압력강하의 변화를 관찰하였다. 또한 압축기 오일이 열전달에 미치는 영향을 확인하기 위해 PAG 오일의 질량농도를 5%wt까지 변화시켜 오일혼합에 대한 증발 열전달 특성을 이해하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

CO₂ 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하기 위한 실험 장치를 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.

Fig. 2는 길이 5m로 제작된 마이크로핀관 실험부의 내벽면을 나타낸다. 외경 7.00 mm, 내경 6.16 mm인 마이크로핀관은 내벽에 60개의 흠을 갖고 있으며, 핀각은 53°이고, 관벽 두께는 0.32 mm이다. 마이크로핀관의 길이에 따른 외벽면 온도 측정을 위한 T형 열전대는 실험부 입구를 기준으로 50 cm 간격으로 관 외벽에 10지점에 부착되었으며, 이때 한 지점에서의 온도는 관의 원주방향으로 90°의 각도로 네 곳에서 측정되었다.

외부와 열전달을 최소화하기 위해 단열재로 실험부 외부를 단열하였으며, 또한 직접 가열 방식에 의한 안전문제를 최소화하기 위하여 실험부 양단에 절연피팅을 이용하여 전기 절연하였다.

2.2 실험방법 및 조건

CO₂는 고압의 증발압력을 가지므로 실험 전에 40 kgf/cm²의 고압 질소로 내압 실험을 선행하였다. 실험장치의 기밀성을 확인한 후, 진공펌프를 이용하여 실험장치 내부를 진공한 다음 CO₂를 충전하였다. 또한, CO₂에 PAG 오일을 첨가하여 오일 농도에 따른 증발 열전달 변화를 조사하였다. 실험부의 교체나 충전된 CO₂의 교체 시 오일 농도 변화를 방지하기 위해서 오일 세척을 반복 실시하였다. 실험장치 내의 오일 세척은 우선 실험 장비를 구간별로 나누어 질소와 아세톤, 그리고 CO₂를 이용하였으며, 진공펌프에 의해 강제적으로 관 벽에 유착되어 있는 것을 세척하여 잔류 오일의 양을 최소화하고자 하였다. 특히 순환 펌프 내의 기어부에 잔류하는 오일을 제거하기 위해 직접 분해하여 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

Table 1 Experimental conditions

Tube O.D. [mm]	G [kg/m ² s]	T_{sat} [°C]	q'' [kW/m ²]	Oil Con. (% mass)
7.00	400	-5	10	0
	600	0	20	3
	800			
	1200	5	30	5

길이방향으로 국소 외벽면 온도는 동일위치에서 측정된 4지점의 외벽면 온도를 산술평균하여 산정하였다. Table 1은 질량유속, 열유속, 포화온도, 그리고 오일농도에 대한 실험조건을 나타낸다.

3. Data Reduction

실험부의 증발 열전달계수는 관 반경방향의 1차원 열전도 해석으로 다음의 식으로 구하였다.

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

열유속 q'' 은 다음 식으로 구하였다.

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

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

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

CO₂는 실험부에 인가되는 열유속으로 인해 증발되기 시작되며, 이상상태가 되면 건도로 증발량을 나타낸다. 균일 열유속이 가해지는 수평관에서 x 위치에서의 건도는 식(4)로 구하였다.

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

마이크로핀관의 경우에 관내 형상에 따라 특성 길이가 서로 상이함에 따라 관내 형상의 상대적인 비교를 위하여 Kedzierski et al.⁽¹¹⁾이 제시한 방법을 이용하여 마이크로핀관의 수력직경을 계산하였으며, 본 연구에 사용된 마이크로핀관의 수력직경은 4.36 mm이다.

실험데이터의 오차분석을 위해 ASHRAE Guideline 2-86⁽⁹⁾을 참고하였다. 온도, 질량유속, 열유속, 열전달계수, 압력강하의 최대오차범위는 각각 ±8.0%, ±2.1%, ±1.4%, ±12.2%, ±1.2% 이내로 평가되었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 평활관과 마이크로핀관의 비교

Fig. 3은 질량유속 600, 1,200 kg/m²s, 열유속 20 kW/m², 포화온도 0 °C조건에서 내경 6.16 mm인 마이크로핀관과 내경 7.72 mm인 평활관의 CO₂ 증발 열전달계수를 보여준다. 질량유속 600 kg/m²s에서 평활관의 경우 증발 열전달계수는 대략 7.5~10 kW/m²°C 범위 내에서 측정되었고 건도 0.3에서 드라이아웃 현상이 나타나지만 마이크로핀관은 대략 15~17.5 kW/m²°C 범위 내에서 측정되었고 드라이아웃 현상은 관찰되지 않았다. 또한, 질량유속 1,200 kg/m²s의 경우, 마이크로핀관과 평활관에서 모두 드라이아웃 현상이 나타났지만 마이크로핀관의 경우에 조금 더 높은 건도에서 발생하였다. 또한 동일 건도에서 CO₂ 증발 열전달계수를 비교해보면 마이크로핀관이 평활관보다 약 1.5~2.3배의 높게 측정되었다. 이는 마이크로핀관 내 벽면에 부착된 핀에 의한 전열면적 증가와 난류영향으로 인해 관 벽면의 젖음성이 향상되었기 때문으로, 젖음성은 관내 증발에서 드라이아웃 현상을 지연하는 효과도 있음을 보여준다.

4.2 마이크로핀관의 열전달 특성

Fig. 4는 질량유속 600 kg/m²s, 포화온도 0 °C 조건에서 열유속 10, 20, 30 kW/m²인 경우의 건도에 따른 측정된 관벽온도와 CO₂ 증발 열전달계

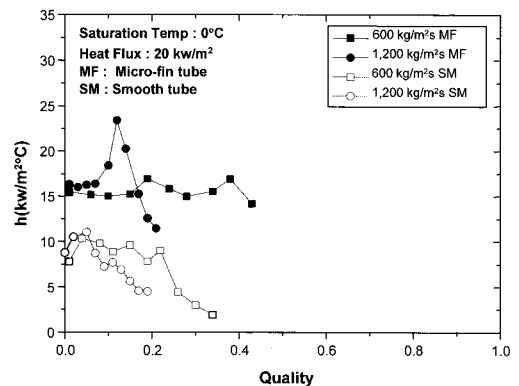


Fig. 3 Comparison of heat transfer coefficient in smooth tube(SM) and micro-fin tube (MF).

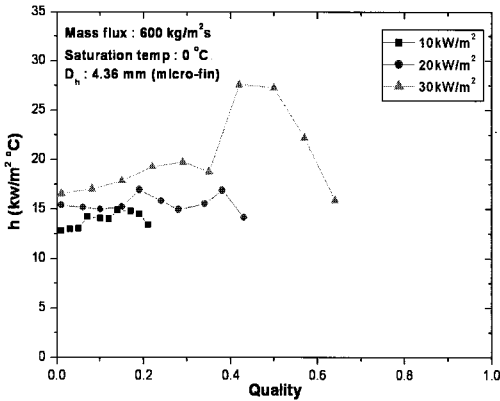


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient on mass flux in micro-fin tube.

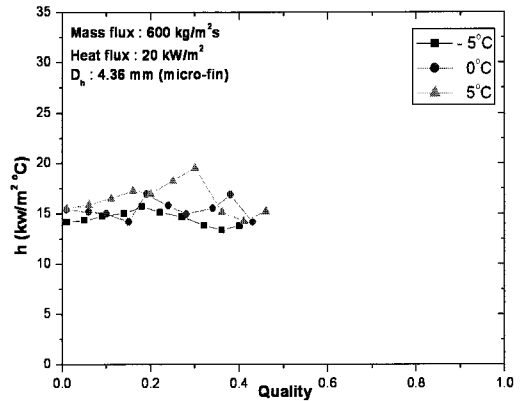


Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient on saturation temperature in micro-fin tube.

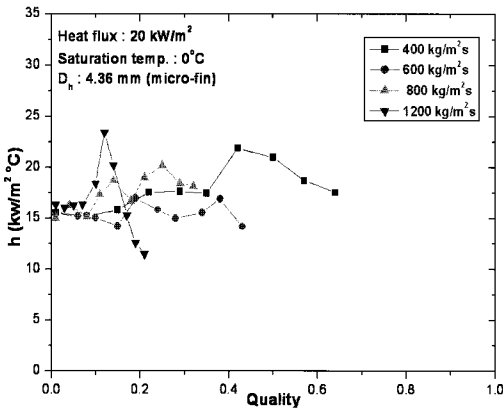


Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient on heat flux in micro-fin tube.

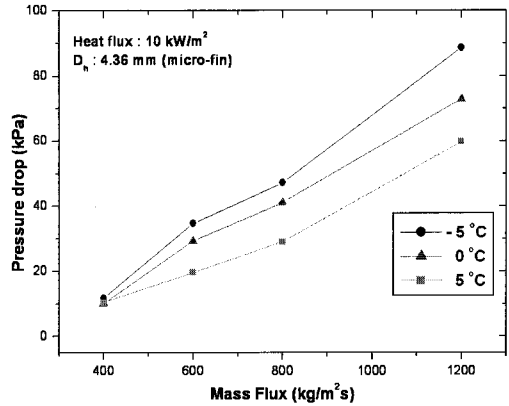


Fig. 7 Variation of pressure drop on saturation temperature in micro-fin tube.

수를 보여준다. 열유속이 증가할수록 높은 열전달계수를 얻을 수 있으며, 열유속 30 kW/m²일 때 건도 0.5부근에서 드라이아웃 현상이 나타났다. 평활관의 기존 연구에서는 건도가 증가하면 열전달계수가 감소하는 경향이 CO₂의 보편적인 특성인데 마이크로핀관에서는 건도가 증가하여도 열전달계수가 감소하지 않고 증가하거나 유지하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 관 내 벽면의 핀과 핀 사이 홈에 액상의 CO₂가 충분히 젖어 있기 때문이며 열전달계수가 감소하지 않는 것은 난류 발생에 의한 대류비동의 효과가 증대되었기 때문으로 이해할 수 있다.

Fig. 5는 열유속 20 kW/m², 포화온도 0 °C 조건에서 질량유속 400, 600, 800, 1,200 kg/m²s인 경우의 건도에 따른 CO₂ 증발 열전달계수를 보여

준다. 질량유속 증가에 따라 증발 열전달계수의 정점과 분포형태는 저건도 영역으로 이동함을 알 수 있다. 질량유속 400~800 kg/m²s의 범위에서는 질량유속의 영향이 매우 적었다. 이는 CO₂의 증발 특성으로 건도가 증가함에 따라 대류비동이 활성화되지 못하고 핵비동이 지배적이기 때문에 질량유속이 증가하여도 열전달계수는 크게 변하지 않았다. 질량유속 1,200 kg/m²s의 경우에 증발 열전달계수가 건도 0.2부근에서 최대값을 가진 후 크게 감소함을 보였다. 이는 마이크로핀관 내의 CO₂ 유동과 관벽 표면현상에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 질량유속 600 kg/m²s, 열유속 20 kW/m² 조건에서 포화온도 -5 °C, 0 °C, 5 °C인 경우, 건도

에 따른 CO₂ 증발 열전달계수를 나타낸다. 급격한 열전달계수의 감소는 발생하지 않았으며, 포화온도가 상승하면 증발 열전달계수가 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 포화온도 상승으로 인한 CO₂의 점성과 표면장력의 감소로 기포발생이 용이하여 핵비등 과정이 원활해지기 때문이다.

Fig. 7은 열유속 10 kW/m²에서 포화온도 -5 °C, 0 °C, 5 °C 변화에 따른 마이크로핀관 내 압력강하를 나타낸다. 포화온도가 상승할수록 압력강하는 작게 측정되었으며, 질량유속이 증가할수록 압력강하는 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 마이크로핀관은 평활관과는 달리 압력강하 폭이 상대적으로 크게 측정되는데 이는 관내 표면의 핀에 의한 마찰효과 때문이며, Yun⁽⁴⁾의 연구에서도 보여진다.

4.3 오일농도에 대한 열전달 특성

Fig. 8은 질량유속 600 kg/m²s, 열유속 20 kW/m², 포화온도 0 °C에서 PAG 오일의 질량농도를 0, 3, 5wt.%로 변화한 경우의 CO₂ 증발 열전달계수이다. 오일농도가 증가함에 따라 증발 열전달계수는 감소하였으며 그 감소량은 0wt.%를 기준으로 3wt.%일 경우 약 15%, 5wt.%일 경우 약 27% 정도이었다. 이는 CO₂와 PAG 오일의 혼합효과에 의한 것으로, Masafumi et al.⁽¹³⁾의 연구에도 언급되어 있다.

Fig. 9는 열유속 10 kW/m², 포화온도 0 °C에서 PAG 오일의 질량농도를 0, 1, 3, 5wt.%로 변화한 경우의 CO₂ 증발 압력강하이다. 압력강하는 질량유속이 증가할수록 그 증가폭이 커졌으며 오일의 농도가 증가할수록 압력강하도 증가하였다. 이는 냉매와 오일 혼합물의 점도가 증가하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 질량유속, 열유속, 포화온도 및 오일농도를 변화시키면서 외경 7.00 mm(수력직경 4.36 mm), 길이 5.0 m인 마이크로핀관 내부에서 CO₂의 증발열전달 특성을 조사하여, 다음의 결과를 얻었다.

(1) CO₂의 마이크로핀관과 평활관의 열전달계수를 비교하면 마이크로핀관이 약 1.5~2.3배 크

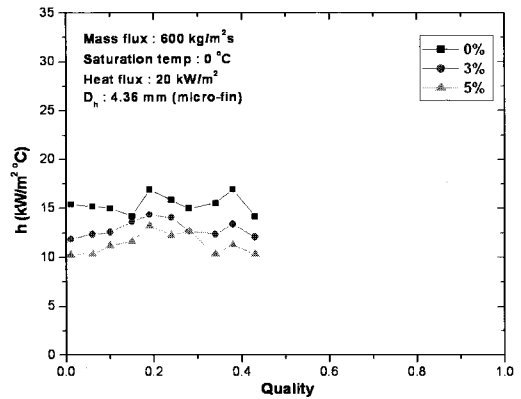


Fig. 8 Variation of heat transfer coefficient on oil concentration in micro-fin tube.

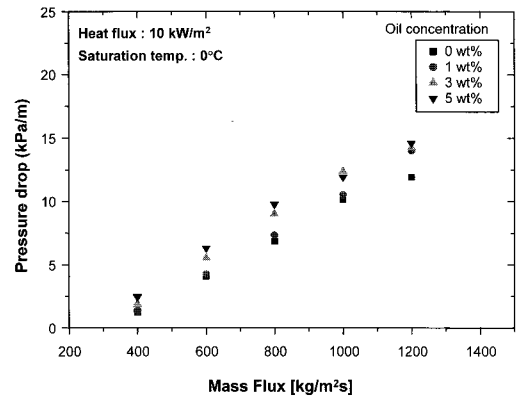


Fig. 9 Variation of pressure drop on oil concentration in micro-fin tube.

게 측정되었다. 이는 마이크로핀관 내벽의 핀과 홈에 의한 난류영향과 젖음성의 향상에 기인한다.

(2) CO₂의 증발 열전달계수는 포화온도, 질량유속보다 열유속에 의해 더 큰 영향을 받으며, 압력강하는 포화온도가 낮을수록 질량유속이 클수록 크게 측정되었다.

(3) 오일 농도에 대한 CO₂의 증발 열전달 특성은 오일을 첨가하지 않은 경우에 비해, 오일 농도가 3wt.%와 5wt.%일 경우에 각각 약 15%와 약 27% 정도 감소하였다. 오일 농도가 높아질수록 CO₂와 오일 혼합물의 점도도 증가하기 때문에 오일농도 5wt.%, 질량유속 1,200 kg/m²s일 때 압력강하는 22%까지 증가하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hwang, J. H., Yun, L. and Kim, Y. C., 2001, Evaporation heat transfer characteristics of R-134a and CO₂ in a horizontal smooth tube, Proceeding of SAREK, pp. 1309-1313.
2. Cho, Y. S., 2000, An experimental study on the characteristics of evaporative heat transfer of carbon dioxide., M.S. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
3. Yun, L., 2003, Convective boiling of carbon dioxide in mini tubes and micro-channels, Ph.D. thesis, Korea University, Seoul, Korea.
4. Yoon, S. H., 2002, Studies on the characteristics of evaporation and supercritical gas cooling heat transfer of carbon dioxide, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
5. Lee, S. J., Kim, D. H. and Choi, J. Y., 2005, Characteristics of Evaporation Heat Transfer on Carbon Dioxide in Smooth Tube, 6th KSME-JSME thermal and fluids engineering conference. DD 07.
6. Schlager, L. M., Pate, M. B. and Bergles, A. E., 1990, Evaporation and condensation heat transfer and pressure drop in horizontal 12.7 mm micro-fin tubes with refrigerant 22, Journal of Heat Transfer, Vol. 122, pp. 1041-1047.
7. Kattan, N., Thome, J. R. and Favrat, D., 1995, Boiling of R-134a and R-123 in a micro-fin tube, 19th International Congress of Refrigeration, Vol. 4a, pp. 337-344.
8. Cho, J. M., Kim, Y. J., Yoon, S. H. and Kim, M. S., 2005, An experimental study on the evaporative heat transfer characteristics of CO₂ in smooth and micro-fin tubes, Proceeding of SAREK, pp. 475-480.
9. Cho, K. N. and Tae, S. J., 1999, Effect of refrigeration lubricants on the heat transfer performance in the microfin tube evaporator, SAREX, Vol. 11, No. 1, pp. 61-72.
10. 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 microfin tube, Journal of Air-conditioning and Refrigeration Vol. 5, pp. 45-56.
11. Choi, J. Y., Kedzierski, M. A., Domanski, P. A., 1999, A generalized pressure drop correlation for evaporation and condensation of alternative refrigerants in smooth and micro-fin tubes, NISTIR 6333.
12. ASHRAE Guideline pp. 2-86.
13. Masafumi, K., Nobutaka, T., Ichiro, K. and Hiroshi M., 2002, Characteristics of heat transfer coefficient and pressure drop on mixing CO₂ and oil(PAG), Proceeding of ACRAC, pp. 67-74.