

미세채널 내 이산화탄소의 증발 열전달 특성 및 오일의 영향에 관한 실험적 연구

이상재, 김대훈, 최준영*, 이재현**, 권영철***†

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

Experimental Study on Characteristics of Evaporation Heat Transfer and Oil Effect of CO₂ in Mini-channels

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 July 28, 2008; revision received November 13, 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 mini-channels were 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($300\sim800 \text{ kg/m}^2\text{s}$), heat fluxes($10\sim40 \text{ kW/m}^2$), saturation temperatures($-5\sim5^\circ\text{C}$), and PAG oil concentration(0, 3, 5 wt%). The variation of the heat transfer coefficient was different according to 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), Mini-channels(미세채널)

기호설명

C	: 오일 혼합
D	: 관지름 [m]
G	: 질량유속 [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
h	: 열전달계수 [$\text{kW}/(\text{m}^2\text{C})$]
k	: 열전도도 [W/mK]

T : 온도 [$^\circ\text{C}$]

q'': 열유속 [W/m^2]

X : 전도 [-]

하침자

i : 내부

o : 외부

sat : 포화온도

w : 벽

† Corresponding author

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

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

1. 서 론

환경 문제로 인한 차세대 대체냉매로 CO_2 가 다시 주목을 받게 되면서 프레온 냉매가 오존총파괴 및 지구온난화 같은 환경문제를 일으켜 이를 해결하기 위해 자연냉매에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 대체냉매로써 HFC계 냉매와 혼합냉매를 사용하는 방안도 고려되고 있지만 높은 GWP로 인해 온실효과 가스로 지정되면서 지속적인 사용을 하지 못하는 설정이다. 따라서 대체냉매로써 자연냉매의 회귀는 필연적인 대안이 될 수 있을 것이다. 특히 CO_2 는 천연냉매로서의 장점과 더불어 독성과 인화성이 없을 뿐만 아니라 경제성 측면에서도 큰 장점을 지니고 있으며, 또한 기존 냉매에 비하여 단위체적당 냉각능력이 크고 응용온도 범위에서 압력비가 작으므로 냉매 사이클에 적용 시 보다 좋은 성능을 낼 수 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 CO_2 의 냉매적 특성을 잘 대변할 수 있는 미세채널은 높은 작동압력을 견딜 수 있고 단위 면적당 접촉면적의 증가로 인해 전열특성이 우수하다. 또한 시스템 적용 시 효율증대와 소형화, 냉매량 감소 등의 효과를 기대할 수 있다.

CO_2 시스템의 연구는 Lorentzen과 Pettersen에 의해 발표되고 난 이후 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁻²⁾ Pettersen et al.⁽³⁾은 수력직경 0.80 mm의 원형 다채널을 이용하여 열전달과 압력강하에 대해 실험을 수행하여 고전도 영역이 되면 증발온도와 질량유속이 높을 경우, 열전달 계수가 급격히 감소하는 경향을 밝혔다. Zhao et al.⁽⁴⁾은 수력직경 0.86 mm의 삼각 다채널로 CO_2 와 R134a의 열전달 특성을 비교하였으며, CO_2 의 경우 열유속과 질량유속에 독립적이고 단지 채널의 형상과 크기에 대해 다채널의 열전달 메커니즘이 의존한다고 보고하였다. Choi et al.⁽⁵⁾은 CO_2 로 수력직경 1.54와 1.36 mm의 수평다채널을 이용하여 증발열전달과 압력강하에 관하여 연구하였다. 증발 열전달계수는 열유속과 포화온도가 증가할수록 수력직경이 작을수록 증가하고 질량유속에는 영향이 적다는 연구 결과를 제시하였다. Lee⁽⁶⁾는 수력직경 1.29 mm인 다채널을 이용하여 증발열전달과 압력강하에 대해 조사하여, 증발열전달은 열유속과 증발온도에 민감하고 질량유속에 대한 영향은 적다고 하였으며 압력강하

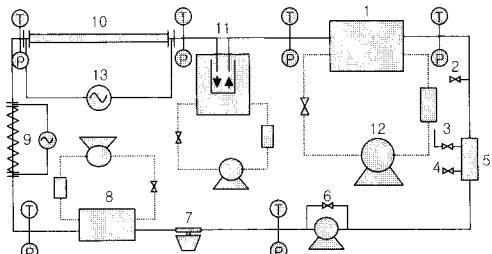
는 질량유속이 가장 큰 영향을 주는 요인이라고 하였다. Lee et al.⁽⁷⁾은 마이크로핀란에서 오일농도(0~5 wt%)가 증가할수록 증발열전달계수를 최대 27%까지 감소시키고, 압력강하는 오일농도를 증가할수록 증가하며 이는 오일과 CO_2 혼합물의 영향으로 보고하였다.

기존 연구는 다채널의 열전달 및 압력강하 특성에 관한 연구로 제한적 연구를 수행하였다. 이에 본 연구에서는 보다 작은 수력직경을 갖는 미세채널의 열전달 특성을 파악하고 오일혼합에 의한 열전달 및 압력강하의 특성을 파악하고자 한다. 본 연구에 적용된 수력직경 0.68 mm인 수평미세채널은 열전달 특성을 파악하기 위해 질량유속(300~800 kg/m²s), 열유속(10~40 kW/m²) 그리고 포화온도(-5~5 °C)를 변화시켰고, 오일혼합의 영향을 관찰하고자 오일농도 3, 5 wt%에서 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

CO_2 증발 열전달계수와 압력강하를 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. CO_2 는 순환용 기어펌프에 의해 순환되고 질량유량계에 의해 밀도와 유량이 측정된다. 시험부의 입구조건을 만족하기 위해 부냉각기와 예열기를 시험부 전단에 설치하였다. 시험부의 온도와 압력을 측정하기 위해 열전대와 압력계를 설치하였고, 시험부에 열량을 공급하기 위해 직접 가열 방식을 채택하였으며, 시험부를 통과한 이상상태의 CO_2



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. reserved tank 11. test section 12. refrigerator
13. DC power supply

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

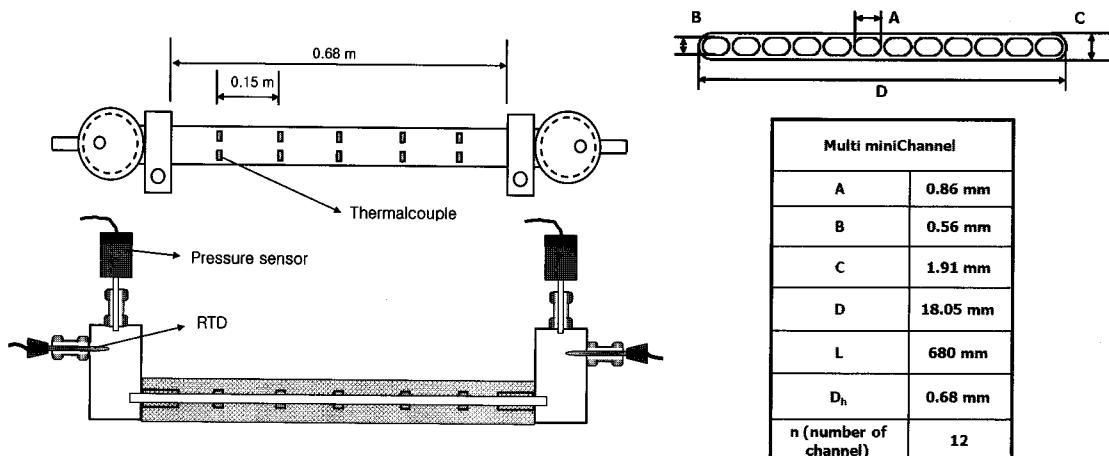


Fig. 2 Schematic diagram of the test section.

는 주냉각기에서 과냉각 상태로 환원되게 구성하였다. 과냉각 상태의 CO₂와 PAG 오일을 혼합하기 위한 오일탱크(oil mixing tank)를 두어 질량비에 맞게 오일량을 조절하여 첨가할 수 있도록 하였다. Fig. 2에 도시한 시험부는 길이 680 mm이고, 외벽면 온도 측정을 위한 T형 열전대가 시험부 입구를 기준으로 일정한 간격으로 관 외벽에 다섯 곳에 부착되었으며, 이때 한 지점에서의 온도는 관 상부와 하부에 각각 두 곳에서 측정된다. 미세채널은 12개의 채널로 구성되며 상세한 크기는 Fig. 2에 나타내었다.

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. 시험부의 교체나 충전된 CO₂ 교체 시 오일농도변화를 방지하기 위해 오일세척을 반복 실시하였다. 오일세척은 우선 실험장치를 구간별로 나누어 질소와 아세톤, 그리고 CO₂를 이용하였으며, 진공펌프를 이용하여 강제적으로 관 벽에 유착되어 있는 것을 세척하여 잔류오일의 양을 최소화하고자 하였다. 특히 순환 펌프 내의 기어부에 잔류하는 오일을 제거하기 위해 직접 분해하여 오일을 제거하였다.

CO₂의 물성계산은 NIST에서 개발한 냉매 물성계산 프로그램 REFPROP(Ver 6.01)⁽⁸⁾를 사용

하였다. CO₂를 시험부에 순환시키면서 입구온도와 질량유량이 설정치의 ±0.1 °C, ±3%이내로 각각 만족하면 정상상태로 간주하여 실험을 수행하였다. 측정된 데이터는 정상상태에서 10분 동안 다채널 기록계와 GPIB 통신을 통해 저장된다. 실험부에서 측정된 4지점의 외벽면 온도를 산술평균하여 산정하였다. Table 1은 질량유속, 열유속, 포화온도, 그리고 오일농도에 대한 실험조건을 나타낸다.

시험부의 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.

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

Table 1 Experimental conditions

D_h [mm]	G [kg/m ² s]	q'' [kW/m ²]	T_{sat} [°C]	C_o [wt%]
0.68	300	10	-5	0
	400	20	0	3
	600	30	5	5
	800	40		

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

실험데이터의 오차분석을 통해 온도, 열전달계수, 압력강하 그리고 오일농도의 최대오차범위는 각각 $\pm 8.4\%$, $\pm 11.3\%$, $\pm 1.1\%$ 그리고 $\pm 6.3\%$ 이내로 평가되었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 실험에서 측정한 열전달계수의 신뢰성을 확보하기 위해 기존 연구자들의 데이터와 비교하였다. 포화온도 0 °C, 열유속 20 kW/m² 그리고 질량유속 400 kg/m²s일 때, 건도변화에 따른 증발 열전달계수를 나타내며 열전달계수는 건도가 증가하여도 일정한 영역에서 거의 변화가 없이 나타났다. 동일한 건도에서 증발 열전달계수는 수력직경 차이에 의해 다소 차이를 보이며, 이는 수력직경이 작을수록 일정면적당 넓은 접촉 면적을 갖게 되므로 열전달이 향상되게 된다.⁽⁵⁾

Fig. 4는 포화온도 0 °C, 질량유속 800 kg/m²s의 조건에서 열유속 변화와 오일혼합에 따른 증발 열전달계수의 변화를 나타낸다. 열유속은 10~40 kW/m²로 10 kW/m²씩 증가하여 증발 열전달계수를 조사하였다. 열유속이 증가할수록 높은 열전달계수를 얻을 수 있었다. 그러나 열유속 30, 40 kW/m²는 건도 0.3이후에 증발 열전달계수가 급격히 감소하였다. 이는 CO₂가 아임계 영역에서

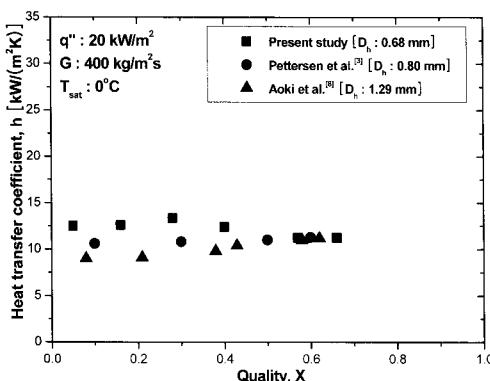


Fig. 3 Comparison of measured heat transfer coefficient with Pettersen and Aoki et al. data.

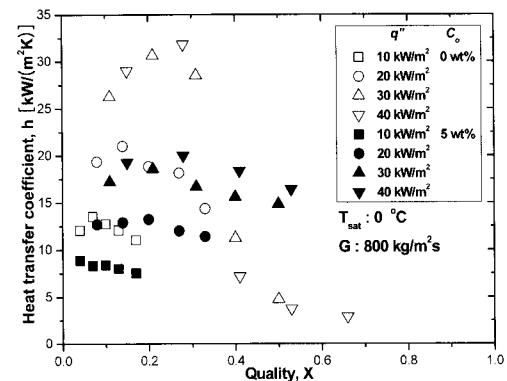


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient with respect to quality at heat flux and oil concentration.

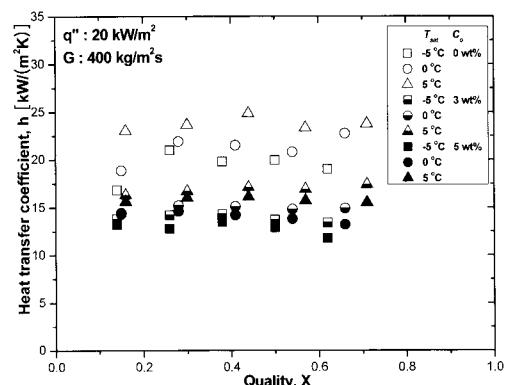


Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient with respect to quality at saturation temperature and oil concentration.

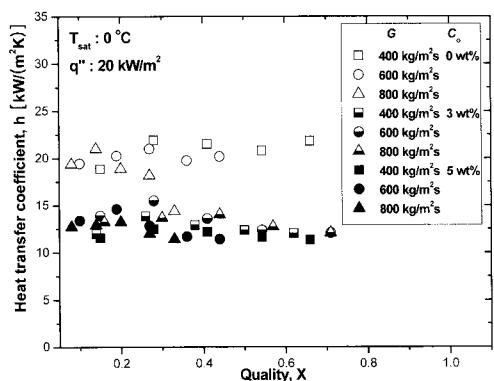


Fig. 6 Variation of heat transfer coefficient with respect to quality at mass flux and oil concentration.

증발과정이 이루어지므로 표면장력과 점성이 감소하여 액막이 부분적으로 파괴되어 나타나는 드라이아웃 현상으로 해석될 수 있다.⁽¹⁰⁾ 오일혼합을 5 wt%로 첨가하면 드라이아웃이 발생하지 않은 경우($10, 20 \text{ kW/m}^2$) 약 32%의 열전달계수가 감소되었고, 드라이아웃이 발생한 경우($30, 40 \text{ kW/m}^2$) 드라이아웃 이후의 건도에서는 열전달계수가 높게 측정되었다. 오일과 CO_2 는 서로 다른 밀도를 갖고 상대적으로 높은 비등온도를 갖는 오일이 드라이 아웃을 지연하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 포화온도 변화에 대한 CO_2 증발 열전달계수의 변화와 오일혼합에 의한 영향을 나타낸다. 질량유속 $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 20 kW/m^2 의 조건에서 관내 건도변화에 대한 증발 열전달계수의 분포는 포화온도가 증가할수록 열전달계수가 향상됨을 알 수 있다. 포화온도 상승으로 인한 CO_2 의 점성과 표면장력의 감소로 기포발생이 활발해져 핵비등 효과가 커졌기 때문이다. 오일농도가 증가할수록 포화온도 변화에 대한 증발열전달계수는 포화온도 상승에 따른 영향이 감소하였고, 오일을 혼합하지 않은 경우와 비교하여 오일농도가 3 wt%와 5 wt%일 때 약 27%, 35% 정도 감소함에 따라 오일은 관벽과 CO_2 의 열전달 메커니즘에 있어 열저항이 되는 것으로 해석될 수 있다.

Fig. 6은 포화온도 0°C , 열유속 20 kW/m^2 의 조건에서 질량유속 $400\sim800 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 범위 내에서 질량유속 변화와 오일혼합의 영향에 대해 CO_2 증발 열전달계수를 나타낸다. 관내 건도변화에 대한 CO_2 증발열전달계수의 변화는 질량유속이 증가하여도 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 질량유속이 CO_2 증발열전달에 미치는 영향이 크지 않음을 보여준다. 이러한 결과는 Hihara and Tanaka⁽¹¹⁾의 결과와 일치한다. 또한 건도변화에 대한 증발 열전달계수는 건도증가에 관계없이 일정한 영역에서 관찰되고 있다. 그러나 질량유속 $800 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 은 다른 질량유속과 달리 건도 0.3이후에 증발 열전달계수가 감소하는 경향이 나타났다. 오일농도가 3, 5 wt%에서 모든 질량유속은 열전달계수가 감소하였고, 특히 질량유속 $800 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 발생했던 열전달계수의 감소는 보이지 않고 다른 질량유속과 동일하게 일정한 영역에서 열전달계수가 관찰되었다.

Fig. 7은 실험에서 측정된 열전달계수와 Kandlikar et al.⁽¹²⁾이 제안한 다채널에서 저 레이놀즈

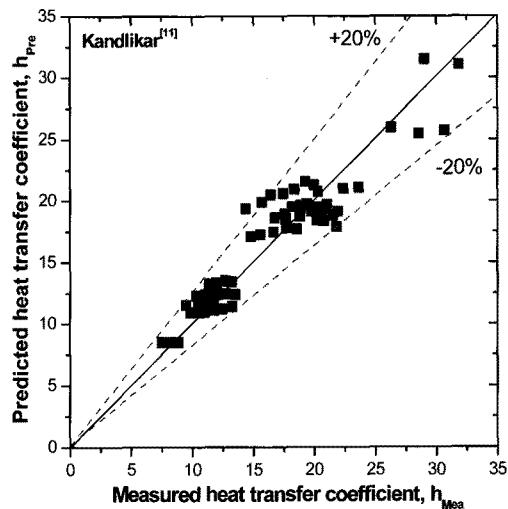


Fig. 7 Comparison between predicted heat transfer coefficient and measured heat transfer coefficient.

수를 갖는 유동에 대한 상관식에 의해 예측된 열전달계수를 비교하였다. Kandlikar et al.⁽¹²⁾이 제안한 상관식은 약 20%내에서 잘 일치하였다. 이상관식은 총류 영역 내에서 건도증가에 따른 핵비등의 영향이 감소하는 것을 반영하고 있어 CO_2 의 증발특성과 잘 일치하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 열유속 20 kW/m^2 의 실험조건에서 다양한 포화온도에 대해 질량유속 변화에 따른 압력강하를 나타내었다. CO_2 의 포화온도가 상승할수록 증발 압력강하는 감소하는 것을 알 수 있다. 포화온도 상승에 의해 CO_2 의 표면장력과 점

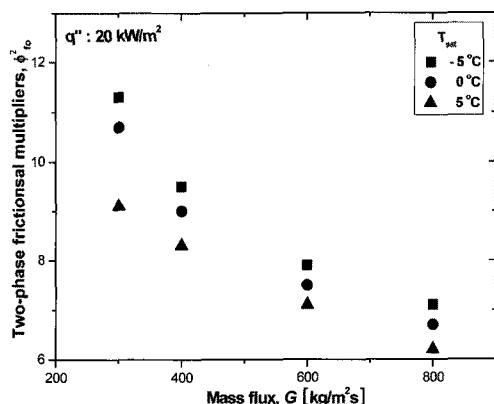


Fig. 8 Variation of pressure drop with respect to mass flux at saturation temperature.

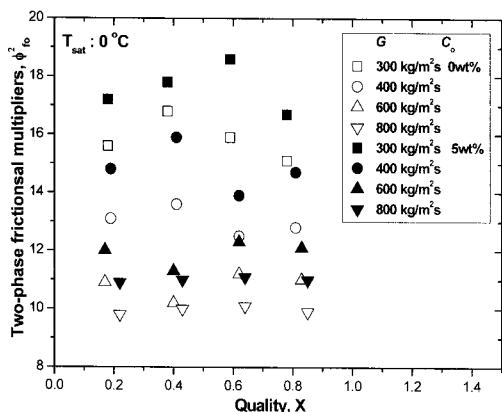


Fig. 9 Variation of pressure drop with respect to quality at mass flux and oil concentration.

성계수가 감소하기 때문이다.

Fig. 9는 포화온도 0°C 에서 여러 질량유속에 대해 건도변화에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. 건도증가에 따라 압력강하의 변화는 고질량유속에서는 변화가 거의 없고 저질량유속으로 갈수록 그 변화가 커졌다. 반면 질량유속 변화에는 크게 증가하였다. 오일혼합의 영향은 증발 압력강하를 증가시켰다.⁽¹³⁾ 오일과 CO_2 는 완전혼합되지 않아 서로 계면에서의 마찰전단력이 증가하여 압력강하가 증가하는 요인으로 작용하게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 질량유속, 열유속, 포화온도 그리고 오일농도를 변화시켜 수력직경 0.68 mm인 수평 미세채널로 CO_2 의 증발 열전달계수, 압력강하 그리고 오일혼합에 따른 특성을 조사하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) CO_2 의 증발 열전달계수는 열유속이 클수록, 포화온도가 높을수록 증가하였으며, 질량유속의 영향은 미비하게 관찰되었다. 또한, 800 kg/m^2 이상의 질량유속과 30 kW/m^2 이상의 열유속 실험 조건에서 드라이아웃 현상이 나타났다.

(2) CO_2 의 증발 압력강하는 포화온도가 낮을수록, 질량유속이 클수록 증가하였다. 오일 혼합에 의한 압력강하는 오일막에 의해 계면 전단력의 증가로 인해 압력강하도 증가하였다.

(3) 오일혼합은 관 내부에서 완전 혼합되지 않

기 때문에 오일막을 형성시켜 증발열전달계수를 감소시키고 계면에서의 마찰력 상승으로 인해 압력강하를 증가시켰다. 그러나 드라이아웃이 발생되는 건도는 오일의 비등온도에 의해 고건도 영역으로 이동하는 효과가 나타났다.

후 기

본 논문은 산업자원부 차세대 신기술 개발사업의 지원에 의해 수행하였습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 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.
- 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.
- Pettersen, J., Rieberer, R. and Mnkejord, S. T., 2000, Heat transfer and pressure drop characteristics of evaporating carbon dioxide in micro-channel tubes, Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Purdue, USA, pp. 107-114.
- Zhao, Y., Molki, M. and Ohadi, M. M., 2000, Heat transfer and pressure drop of CO_2 flow boiling in microchannels, Proceeding of the 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida.
- Choi, C. S., Yun, R. and Kim, Y. C., 2002, Experimental study on evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of CO_2 in horizontal microchannel tubes, SA-REK summer conference proceeding, pp. 1443-1450.
- Lee, J. J., 2002, An experimental study on heat transfer and pressure drop of carbon dioxide flowing in a micro-channel tubes, M.

- D. thesis, Sogang University, Seoul, Korea.
7. Lee, S. J., Kim, D. H., Choi, J. Y., Lee, J. H. and Kwon, Y. C., 2008, Experimental study on effect of PAG oil for CO₂ evaporation heat transfer, SAREX, Vol. 20, No. 5, pp. 357-363.
8. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, NIST Thermo-dynamic Properties and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP), Version 6.02, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
9. Aoki, Y., Taniguchi, M. and Watanabe, Y., 2002, Boiling heat transfer of natural refrigerant CO₂ in a small tube, Proceedings of the Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning 2002, Kobe, Japan, pp. 87-92.
10. 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.
11. Hihara, E. and Tanaka, S., 2000, Boiling heat transfer of carbon dioxide in horizontal tubes, Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Purdue, USA, pp. 279-284.
12. Kandlikar, S. G. and Balasubramanian, P., 2003, Extending the applicability of the flow boiling correlation to low Reynolds number flows in microchannels, ICMM2003, New York, USA, pp. 1-6.
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.