

# 이산화탄소의 마이크로 핀관 내 상향유동 증발열전달 특성에 관한 연구

김 용 진, 조 진 민, 김 민 수<sup>†</sup>

서울대학교 기계항공공학부

An experimental study on heat transfer characteristics in a vertical micro-fin tube during evaporation process of carbon dioxide flowing upward

Yong Jin Kim, Jin Min Cho, Min Soo Kim<sup>†</sup>

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

**ABSTRACT:** Because of the ozone layer depletion and global warming, new alternative refrigerants are being developed. In this study, evaporation heat transfer characteristics of carbon dioxide flowing upward in a vertical micro-fin tube have been investigated by experiment. Before a test section, a pre-heater is installed to adjust the inlet quality of the refrigerant to a desired value. The micro-fin tube with outer diameter of 5 mm and length of 1.44 m was selected as the test section. The test was conducted at mass fluxes of 318 to 530 kg/m<sup>2</sup>s, saturation temperature of -5 to 5°C, and heat fluxes of 15 to 30 kW/m<sup>2</sup>. As the vapor quality increases, the heat transfer coefficients of carbon dioxide are increased, and the heat transfer coefficients increase when the heat fluxes and saturation temperatures increase, and there was not much of influence of mass flux on the heat transfer coefficients.

**Key words:** Heat transfer coefficient(열전달계수), Evaporation(증발), Vertical micro-fin tube (수직마이크로관), Upward flow(상향유동), Pressure drop(압력강하)

## 기 호 설 명

$G$  : 질량유속 [kg/m<sup>2</sup>s]

$h$  : 열전달계수 [W/m<sup>2</sup>K]

$T_{sat}$  : 포화온도 [°C]

## 하첨자

sat : 포화상태

## 1. 서 론

현대 산업사회의 부산물로 인한 환경문제가 대

두된 지 오래이다. 따라서 20세기 초부터 사용되어 온 CFC, HCFC 및 HFC 계열의 냉매를 대신할 수 있는 환경친화적인 대체 냉매에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 냉동 및 공조 분야의 중요한 연구과제이다. 또한, 교토의정서와 환경 규제 협약들로 인하여 미국, 유럽, 일본 등에서는 이산화탄소, 암모니아와 같은 천연냉매를 사용한 냉동 및 공조 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

이에 오존층파괴지수와 지구온난화지수가 거의 영에 가깝고, 인체에 해를 미치지 않으며 탄화수소(HC)계열의 냉매와는 달리 가연성이 없을 뿐만 아니라 상대적으로 가격이 저렴하고 응용온도 범위에서 작동압력이 높아서 시스템의 소형화를 도

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-880-8362; fax: +82-2-883-0179

E-mail address: minskim@snu.ac.kr

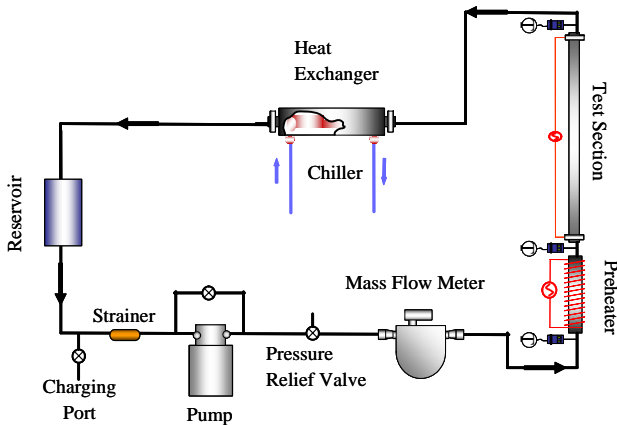


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

모할 수 있는 환경 친화적 자연냉매인 이산화탄소를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

또한, 현재 냉동 및 에어컨 시스템의 열교환기에 널리 사용되고 있는 마이크로 핀관(micro-fin tube)은 외경 4-15 mm 정도의 동으로 제작된 관에 50-70 개의 나선형의 핀이 관 내부에 6°-30°의 각도로 형성되어 있으며, 핀은 0.1-0.25 mm 정도의 높이와 25°-90° 정도의 핀 각도(apex angle)의 기하학적 형상을 가지고 있다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 알려진 마이크로 핀관의 전열 촉진 메커니즘 3가지는 i) 마이크로 핀으로 인한 유효전열면적의 증가, ii) 표면장력에 의한 냉매 액상 성분의 핀과 핀사이 간극으로의 배수효과, iii) 마이크로 핀에 의해 액막에 발생하는 난류효과 등이다<sup>(2)</sup>.

1970년대부터 마이크로 핀관이 연구된 이후부터 여러 가지 핀의 형상에 따른 열전달 성능의 변화에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔으며, Schlager et al.<sup>(3)</sup>은 냉매 R22를 이용하여 외경이 9.52 mm인 마이크로 핀관(외경:9.5 mm)에서 증발 및 응축열전달 실험을 수행하였다. Cho et al.<sup>(4)</sup>는 냉매로 이산화탄소를 이용하여 5 mm와 9.52 mm의 평활관 및 마이크로 핀관에서 증발열전달에 관한 실험을 수행 하였으며, 각각 다른 조건의 증발 온도, 질량유속(mass flux) 및 열유속(heat flux)에서 5 mm와 9.52 mm 시험부에서 170-210%와 150-200%정도 더 높은 열전달 성능을 보였다<sup>(4)</sup>. 하지만 이 연구들은 대부분이 이산화탄소의 수평관(horizontal tube)에 관한 연구들

이 주를 이룬다. 그러나 실제 열교환기에서 빼놓을 수 없는 수직관 부분에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 Choi<sup>(5)</sup>는 외경 6.35 mm, 내경 4.57 mm의 1.9 m의 관에서 상향유동(flowing upward) 수직관(vertical tube)에서의 증발 열전달 특성에 관한 연구를 하였다. 그러나 이 실험은 평활관(smooth tube)에서만 국한된 실험이었었다.

따라서 본 연구에서는 환경 친화적 대체냉매인 이산화탄소를 이용하여 외경 5 mm, 길이 1.44 m인 수직 마이크로 핀관을 이용하여 증발 열전달 특성을 살펴보고 그에 따른 압력 강하에 대해서 분석해보았다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 폐회로를 이루고 있다. 펌프에서 유출되는 냉매는 질량유량계(mass flow meter), 열교환기(heat exchanger), 예열기(preheater), 시험부(test section), 수액기(liquid receiver) 그리고 열교환기를 거쳐 다시 펌프로 들어오는 루프를 순환시켰다. 펌프로는 오일이 필요 없이 과냉상태인 액상의 냉매를 순환시키기 위하여 마그네틱 기어펌프를 장착하였으며, 질량유량계는 액상에서의 유량을 측정하기 위하여 예열기 전에 설치하였다. 유량계를 통과한 냉매는 시험부 입구에서 원하는 과냉도 및 건도 조절용으로 사용되는 열교환기와 예열기를 통과하도록 하였다. 예열기는 외경 5 mm의 동관을 사용하였으며, 동관 주위를 절연 테이프로 감싼 후 니크롬선으로 감아 유리섬유로 단열을 하였다. 니크롬선 양 끝단은 가변 전원 공급기에 연결하여 열량을 조절하므로써 시험부 입구의 건도를 조절하였다. 예열부를 통과한 냉매는 다시 직접 가열에 의해 열을 공급받아 증발과정을 거친 후 수액기로 들어가게 하였다.

### 2.2 시험부

Fig. 2는 본 연구의 시험부에 대한 개략도를 나타낸다. 시험부는 외경 5 mm, 두께 0.5 mm, 유효가열 길이 1440 mm의 동관과 압력 측정을 위한 압력탭, 관벽 온도 측정을 위한 T형 열전대와 시

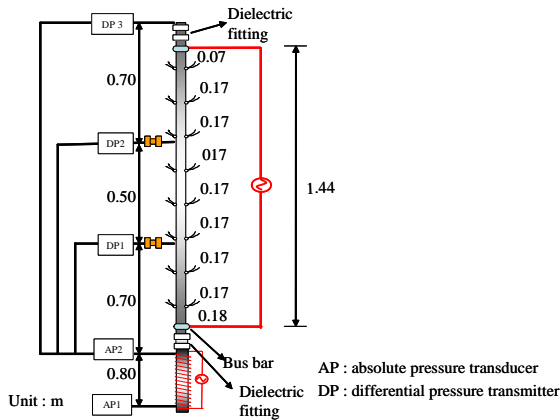


Fig. 2 Schematic diagram of the test section.

험부 양끝단의 절연을 위한 절연 피팅(dielectric fitting) 등으로 구성되어 있다. 1440 mm의 시험부는 열적입구효과(thermal entry length effect)를 무시하기 위하여 설계되었으며, 시험부를 흐르는 냉매의 포화압력을 측정하기 위하여 시험부의 입구에는 절대 압력계를 설치하였고, 시험부의 중간 그리고 출구에는 차압계를 설치하였다. 관의 외벽면 온도의 측정을 위해서 시험부에 17 cm 간격으로 T형 열전대를 좌,우 양쪽으로 부착하였다. 이는 중력의 영향이 관에 고르게 작용하기 때문에 수평관에서의 상, 하, 좌, 우 4곳의 온도 측정보다는 적은 수의 온도 측정을 하기 위함이다. 또한 시험부로의 외부 열손실과 열유입을 최소화하기 위하여 유리섬유로 단열시켰다. 그리고 본 실험에서는 증발 열전달 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자들인 냉매의 질량 유속을 세 가지 경우로, 외부에서 냉매로 가해지는 열유속을 세 가지 경우로, 냉매의 포화온도를 각각 세 가지 경우로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이를 Table 1에 나열하였다.

### 2.3 실험자료의 처리

시험부에서의 열전달 계수를 구하는 데에는 식(1) 이 이용되며, 이를 이용하기 위해서는 열유속, 증발온도, 시험부의 내벽면 온도를 알아야 한다. 여기서  $q''$ 은 열유속이고,  $T_{wi}$ 는 측정된 외벽면온도를 1차원 열전도식을 고려하여 보정된 내벽면 온도이며,  $T_{sat}$ 는 REFPROP<sup>(6)</sup>을 이용하여 측정된 압력을 이용하여 계산한 증발온도이다.

Table 1 Test condition of the this study

Parameter	Value
Mass flow rate (kg/m <sup>2</sup> s)	318, 424, 530
Heat flux (kW/m <sup>2</sup> )	15, 20, 30
Outlet temperature (°C)	-5, 0, 5

$$h = \frac{q''}{T_{wi} - T_{sat}} \quad (1)$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 열전달

Fig. 3은 포화온도  $-5^{\circ}\text{C}$ , 질량 유속  $318 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 열유속 변화에 따른 증발 열전달 계수 변화를 나타낸다. Fig. 3에서는 저건도 영역에서 열전달 계수가 감소하다가 건도가 증가함에 따라 다시 열전달 계수가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 초기 입구 영역에서 부력 영향(initial buoyancy effect)이 증가함에 따라서 난류열전달효과(turbulent heat transfer effect)가 감소되기 때문이다<sup>(7,8)</sup>. 그러나 이 영역을 지나서 건도가 증가

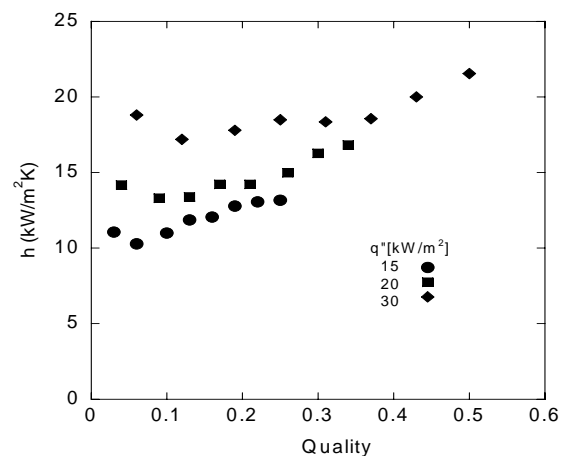


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficients for different heat flux at a mass flux of  $318 \text{ kg/m}^2\text{s}$  and evaporating temperature of  $-5^{\circ}\text{C}$ .

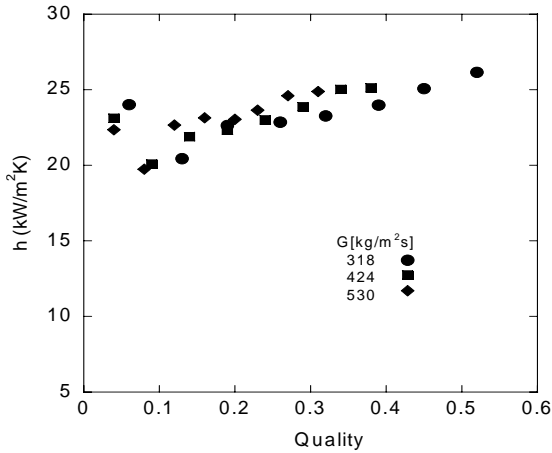


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficients for different mass flux at a heat flux of 30 kW/m<sup>2</sup> and evaporating temperature of 0°C.

함에 따라서 열전달 계수는 다시 증가하는 경향을 보인다. 이 현상은 추가적인 부력 영향 (additional buoyancy effect)이 다시 난류효과 (turbulent mixing effect)를 증가 시켜서 열전달 특성을 향상시키기 때문이다<sup>(7,8)</sup>. 또한, 열유속이 커질수록 더 발달되는 핵비등의 영향으로 전반적으로 높은 열전달계수를 나타냈다.

Fig. 4는 질량 유속의 변화에 따른 열전달계수의 경향을 보여주고 있다. 일반적으로 이산화탄소는 작은 기상과 액상의 밀도비로 인해 대류 비등

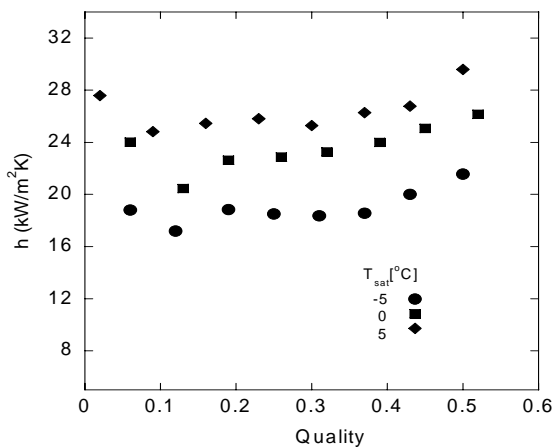


Fig. 5 Variation of heat transfer coefficients for different evaporating temperature at a heat flux of 30 kW/m<sup>2</sup> and mass flux of 318 kg/m<sup>2</sup>s.

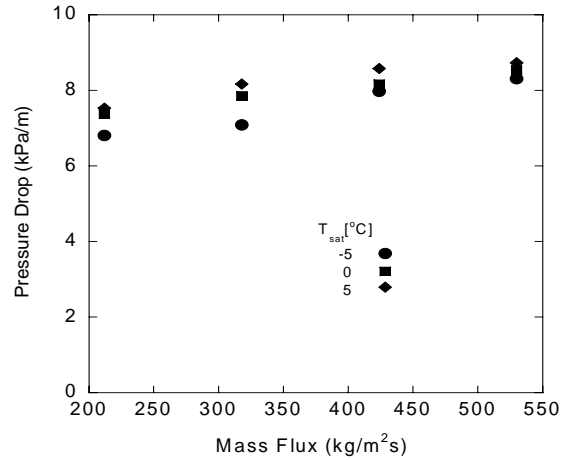


Fig. 6 Pressure drop as a variation of mass flux and evaporating temperature.

의 영향이 적고 핵비등이 지배적이다. 그러나 질량 유속은 핵비등에 그다지 큰 영향을 주지 않기 때문에 질량 유속의 변화에 따른 열전달계수의 변화를 찾아볼 수 없었다. 그러나, 증발 온도가 증가함에 따라서 핵비등(nucleate boiling)이 더욱 활성화되기 때문에, 증발 온도가 증가함에 따라서 열전달 계수가 증가하는 현상을 Fig. 5에서 확인할 수 있다<sup>(4,8)</sup>.

본 실험에서 얻은 데이터들을 Kim et al.<sup>(8)</sup>의 수행된 수직 평활관(vertical smooth tube)에서의 열전달 계수들과 비료를 하였다. 동일한 열유속, 질량유속 및 증발온도의 조건하에서 수행된 데이터들과 비교를 수행한 결과 수직 마이크로 핀관에서 약 1.1-2.1배 정도 열전달 특성이 향상됨을 확인하였다.

### 3.2 압력강하

Fig. 6에는 질량 유량 변화에 따른 압력 강하를 나타내었다. 질량 유량이 증가함에 따라서 본 실험에서는  $G^{1.54}$ 에 비례하여 압력 강하가 증가하였다. Kim et al.<sup>(8)</sup>은 이산화탄소를 이용한 수직 평활관 실험에서 압력 강하가  $G^{1.51}$ 에 비례하여 증가함을 보였다. 이는 마이크로 핀관을 이용했을 때의 압력 강하가 동일한 실험 조건에서 수행된 평활관에서의 압력 강하와 비교 하였을 때 약간 증가하였으나, 그 폭이 무시 할만 했다. 이는 약 1.1-2.1배 정도 열전달 특성이 향상됨에 비해서

압력 강하는 크게 증가하지 않음을 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 5 mm 수직 마이크로 핀관에서 수직상향 유동방향의 이산화탄소의 증발열전달 특성에 관한 실험을 다양한 질량유속, 열유속 및 증발온도 조건에서 살펴보고 압력강하에 대하여 고찰해 보았으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 마이크로 핀관에서 수직상향 유동방향 이산화탄소의 열전달계수는 저건도 영역에서 초기 부력영향으로 감소하였으며, 추가적인 부력영향이 난류영향(turbulent mixing effect)을 증가시켜 열전달 특성을 향상시켰다.

(2) 수직 마이크로 핀관에서는 열유속과 증발온도가 증가함에 따라서 이산화탄소의 열전달계수는 핵비등의 영향으로 증가하였으며, 질량 유속에 따른 영향은 거의 없었다. 또한, 마이크로 핀관에서는 평활관에서 보다 약 1.1-2.1배 정도 열전달 특성이 향상되었다.

(3) 마이크로 핀관에서 증가된 압력강하는 향상된 열전달 특성에 비하여 미미한 수준이었다.

#### 참고문헌

1. Cavallini, A., Del Col, D., Doretto, L. Longo G. A., and Rossetto, L., 2000, Heat transfer and pressure drop during condensation of refrigerants inside horizontal enhanced tubes, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 23, pp. 4-25.
2. Kim, Y. J., Jang, J., Hrnjak, P. S., and Kim, M. S., 2003, An experimental study on condensation heat transfer of CO<sub>2</sub> at low temperature in smooth and micro-fin tubes, *Proceeding of the SAREK 2003*, pp. 50-55.
3. Schlager, L. M., Pate, M. B., and Bergles, A. E. 1990, Heat transfer and pressure drop during evaporation and condensation of R22 in horizontal micro-fin tubes, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 12, pp. 6-14.
4. Cho, J. M. and Kim, M. S., 2007, Experimental studies on the evaporative heat transfer and pressure drop of CO<sub>2</sub> in smooth and micro-fin tubes of the diameter of 5 and 9.52 mm, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 30, pp. 986-994.
5. Cho, J. B., Yoon, S. H., and Kim, M. S., 2001, A study on the characteristics of evaporation heat transfer of carbon dioxide in a vertical tube, *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 31, pp. 218-221.
6. Lemmon, E. W., McLinden, M. O., and Hubber, M. L., 2002, Reference fluid thermodynamic and transport properties(REFPROP), NIST standard reference database 23, version 6.0, National institute of standards and technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
7. Jang, P.X., Xu, Y. J., Lv, J., Shi, R. F., He, S., and Jackson, J. D., 2004, Experimental investigation of convection heat transfer of CO<sub>2</sub> at super-critical pressure in vertical mini-tubes and in porous media, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1255-1270.
8. Kim, Y. J., Cho, J. M., and Kim, M. S., 2007, Experimental study on the evaporative heat transfer and pressure drop of CO<sub>2</sub> flowing upward in vertical smooth and micro-fin tubes with the diameter of 5 mm, *Int. J. Refrigeration*.