

# 이산화탄소의 수직원관 내 상향유동 증발열전달 특성에 관한 연구

김용진<sup>†</sup>·조진민\*·김민수\*\*

## A study on the characteristics of evaporation heat transfer of carbon dioxide flowing upward in a vertical smooth tube

Yong Jin Kim, Jin Min Cho and Min Soo Kim

**Key Words:** Evaporation(증발), Heat transfer coefficient(열전달계수), Carbon dioxide(이산화탄소), Vertical smooth tube(수직평활관), Upward flow(상향유동), Pressure drop(압력강하)

### 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 tube have been investigated by experiment. Before the test section, a pre-heater is installed to adjust the inlet quality of the refrigerant to a desired value. A smooth tube with outer diameter of 5 mm and length of 1.44 m was selected as a test tube. The test was conducted at mass fluxes of 212 to 530 kg/m<sup>2</sup>s, saturation temperature of -5 to 20°C and heat fluxes of 20 to 45 kW/m<sup>2</sup>. As the vapor quality and mass fluxes increase, the heat transfer coefficients of carbon dioxide are decreased, and the heat transfer coefficients increase when the heat fluxes and saturation temperatures increase.

### 기호설명

G : 질량유속(kg/m<sup>2</sup>s)

h : 열전달계수(W/m<sup>2</sup>K)

T<sub>sat</sub> : 포화온도(°C)

### 1. 서 론

현대 산업사회의 부산물로 인한 환경문제가 대두된 지 오래이다. 따라서 20세기 초부터 사용되어온 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 도모할 수 있는 환경친화적 자연냉매인 이산화탄소를 이용한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 이 연구들은 대부분이 이산화탄소의 수평관(horizontal tube)에 관한 연구들이 주를 이룬다. 그러나 실제 열교환기에서 빼놓을 수 없는 수직관 부분에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 Choi<sup>(1)</sup>는 외경 6.35 mm, 내경 4.57 mm의 1.9

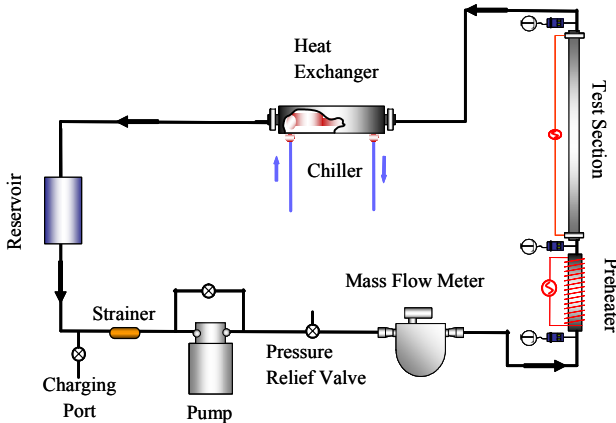
<sup>†</sup> 김용진, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail : syjcot@reflab.snu.ac.kr

TEL : (02)880-1648 FAX : (02)883-0179

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부



**Fig. 1** Schematic diagram of the experimental setup

m의 관에서 상향유동(flowing upward) 수직관(vertical tube)에서의 증발 열전달 특성에 관한 연구를 하였다. 그러나 충분한 열유속(heat flux)을 적용하지 못하는 한계로 인하여 저건도 영역에서만 경향을 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 이산화탄소를 이용하여 외경 5 mm, 내경 4 mm, 길이 1.44 m인 수직 평활관에서 보다 넓은 실험범위에서의 증발 열전달 특성을 분석해보려 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

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 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.

**Table 1** Test conditions for the evaporations in a smooth tube

Parameter	Value
Mass Flow Rate (kg/m <sup>2</sup> s)	212, 318, 424, 530
Heat Flux (kW/m <sup>2</sup> )	20, 30, 45
Evaporation Temperature (°C)	-5, 0, 5, 20

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 시험부 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 네 가지 경우로, 외부에서 냉매로 가해지는 열유속을 세 가지 경우로, 냉매의 포화온도를 각각 네 가지 경우로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이를 Table 1에 나열하였다.

### 2.3 실험자료의 처리

식(1)에 포함된  $q''$ 은 열유속이며,  $T_{wi}$ 는 관의 내벽면온도,  $T_{sat}$ 는 측정된 압력을 REFPROP<sup>(2)</sup>을 이용하여 계산한 냉매의 포화온도를 나타낸다.

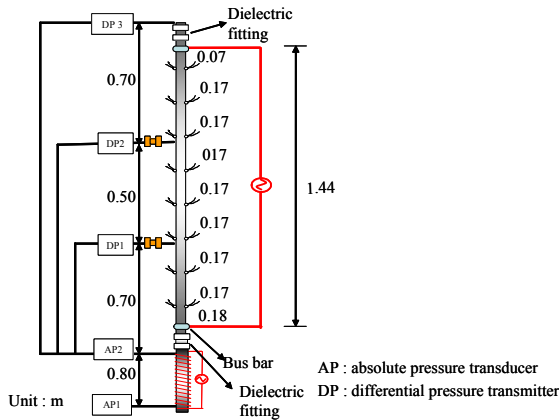


Fig. 2 Schematic diagram of the test section

이 식은 시험부 각 부분에서의 국소 열전달계수를 구하기 위해서 사용된다.

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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 수직관에서의 증발 열전달 계수의 변화

Fig. 3에 포화온도  $-5^{\circ}\text{C}$ , 질량유속  $318 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서의 열유속 변화에 따른 열전달 계수 측정 결과를 나타내었다. 저건도 영역에서 열전달 계수가 증가하다가 건도가 증가함에 따라 열전달 계수가 다시 감소함을 확인할 수 있다. 이는 저건도 영역에서는 건도가 증가함에 따라서 공극률(void fraction)이 증가하여 관에서의 액막이 두께가 감소하여 벽면 과열도가 감소하기 때문에 나타난다. 고건도 영역의 열전달 계수 감소는 이산화탄소의 열물성 영향의 결과이다. 이산화탄소는 다른 냉매와는 다르게 환상류(annular flow)를 유지하는 표면장력과 점성이 매우 작은 값을 갖기 때문에 유동 액막의 과열이 다른 냉매에 비해 낮은 건도에서 발생하여 대류비등의 효과를 현저히 감소시킨다. 그리고 열유속이 증가함에 따라서 열전달계수가 증가하는 이유는 증발 초기에 작용하는 핵비등의 영향으로 저건도 영역에서 큰 열전달계수로 열전달이 시작되기 때문이다.

Fig. 4에서는 열유속  $30 \text{ kW/m}^2$ , 질량유속  $318 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 증발온도에 따른 열전달 계수의 측정 결과를 나타내었다. 포화온도가 증가할수록 열전

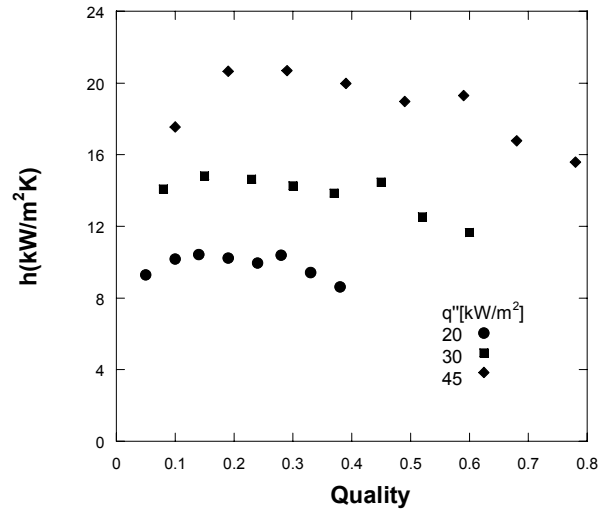


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficients for different heat flux at a mass flux of  $318 \text{ kg/m}^2\text{s}$  and evaporation temperature of  $-5^{\circ}\text{C}$

달 계수가 향상됨을 확인할 수 있다. 이와 관련하여 Ross et al.<sup>(3)</sup>은 R152a 냉매를 이용하여 낮은 압력에서 핵비등이 억제됨을 보인 바가 있다. 또한, 수평관(horizontal tube)에서는 증발온도가 임계온도에 가까워질수록 액상의 점도가 떨어짐에 따라 관 상층부의 액막이 쉽게 깨져서 열전달 계수가 현저하게 감소하는 반면에,<sup>(4)</sup> 수직관(vertical tube)에는 중력이 관 전체에 고르게 작용하기 때문에 수평관에서와 같이 관 일부의 액막이 과

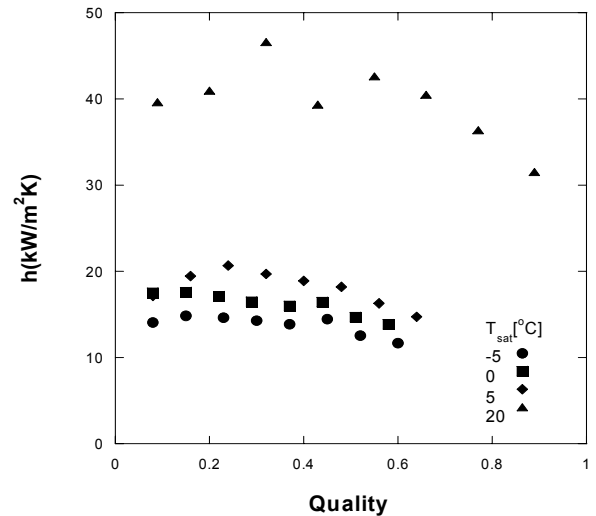
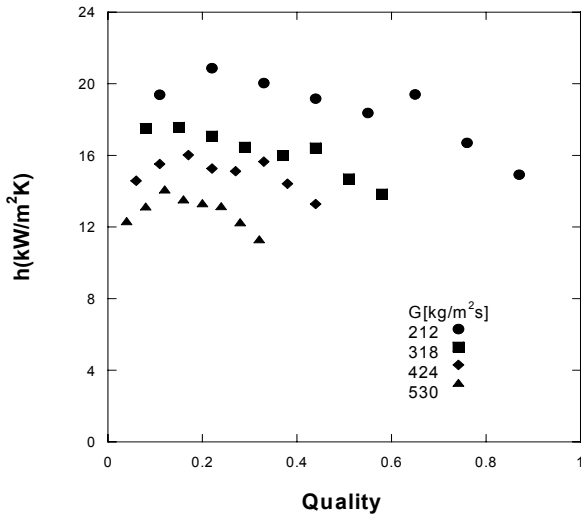


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficients for different evaporating temperature at a heat flux of  $30 \text{ kW/m}^2$  and mass flux of  $318 \text{ kg/m}^2\text{s}$



**Fig. 5** Variation of heat transfer coefficients for different mass flux at a heat flux of 30 kW/m<sup>2</sup> and evaporation temperature of 0°C

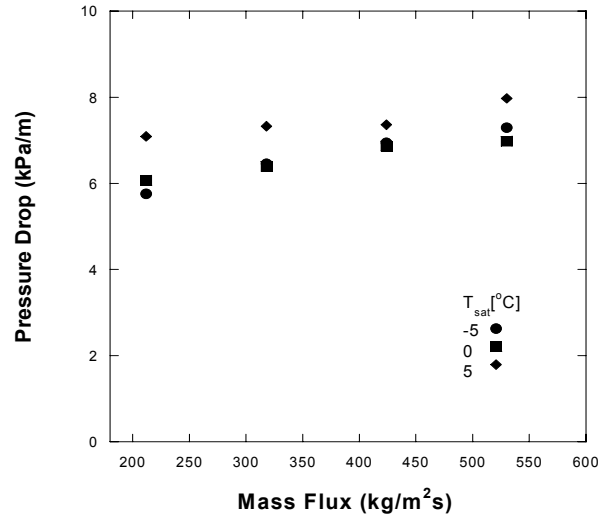
열이 생기지 않아서 열전달 계수가 포화온도 20°C에서도 증가함을 알 수 있다

Sumith et al.<sup>(5)</sup>은 관벽에서 부분적인 드라이아웃(dryout)이 발생함에 따라서 질량 유량이 증가할수록 열전달계수가 감소하는 경향을 보고하였다. 본 실험에서도 Fig. 5와 같은 경향을 확인하였다.

### 3.2 압력강하

Fig. 6에서는 질량유속 변화에 따른 압력 강하 측정 결과를 나타내었다. 질량유속 증가에 따라서 압력강하가  $G^{1.51}$ 에 비례해서 증가하였다. Cho et al.<sup>(4)</sup>는 이산화탄소를 이용한 수평관 실험에서 압력강하가  $G^{1.16}$ 에 비례하여 증가함을 보고하였으며, Kim et al.<sup>(6)</sup>은 R410A를 이용한 실험에서 압력강하가  $G^{2.33}$ 에 비례함을 보였다. 동일하게 이산화탄소를 이용한 수평관에서의 실험 보다는 압력강하의 비가 약간 증가하였으나, 다른 냉매에 비하면 여전히 그 값이 상대적으로 작은 값을 가지고 있기 때문에 압력강하가 열전달에 미치는 영향이 다른 냉매에 비해서 상대적으로 작다는 것을 확인 할 수 있다.

## 4. 결론



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

본 실험에서는 수직원관에서 수직상향 유동방향의 이산화탄소 증발열전달 특성에 관한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 수직상향 유동방향 이산화탄소의 열전달계수는 저건도 영역에서 핵비등의 지배적인 영향으로 증가하였으며, 대류비등이 지배적인 영역의 고건도 영역에서는 이산화탄소의 열물성인 낮은 점성과 표면장력으로 인한 액막의 파열로 고건도로 갈수록 열전달 계수가 감소하는 경향을 보인다.

(2) 수직관에서의 이산화탄소의 열전달계수는 열유속과 포화온도가 증가할수록 핵비등의 영향으로 증가하는 경향을 보였으며, 질량유속이 증가함에 따라서 관벽에 부분적인 드라이아웃 발생함에 따라서 열전달계수가 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다.

(3) 수직원관에서 이산화탄소의 압력강하는 수평관 보다는 컸지만, 다른 냉매와 비교해서는 상대적으로 작은 값을 가지기 때문에 압력강하가 열전달에 미치는 영향이 다른 냉매에 비해서 상대적으로 작다는 결론을 내릴 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Choi 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, No. 7, pp. 218~221.

- (2) Lemmon, E. W., McLinden, M. O. and Hubber, M.L., 2002, Reference fluid thermodynamic and transport properties(REFPROP), NIST standard reference database 23, version 7.0, National institute of standards and technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
- (3) Ross, H., Radermacher, R., Di Marzo, M. and Didion, D., 1987, "Horizontal flow boiling of pure mixed refrigerants", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, No. 5, pp. 979~992.
- (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 diameters of 5 and 9.52 mm", *Int. J. Refrigeration*, pp. 1~9.
- (5) B. Sumith, F. Kaminaga and K. Matsumura, 2003, "Saturated flow boiling of water in a vertical small diameter tube", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, No. 7, pp. 789~801.
- (6) Kim Y. C., Seo K. J. and Chung J. T., 2002, "Evaporation heat transfer characteristics of R410A in 7 and 9.52mm smooth/micro-fin tubes", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 25, No. 6, pp. 716~730.