

# 경사평활관 및 마이크로핀관에서의 이산화탄소의 증발열전달 특성과 압력강하에 관한 실험적 연구

김용진\* · 조진민\* · 김민수†

(2008년 3월 10일 접수, 2008년 6월 10일 수정, 2008년 7월 3일 심사완료)

## Studies on the Evaporative Heat Transfer Characteristics and Pressure Drop of CO<sub>2</sub> Flowing Upward in Inclined (45°) Smooth and Micro-fin Tubes

Yong Jin Kim, Jin Min Cho and Min Soo Kim

**Key Words:** Evaporation(증발), CO<sub>2</sub>(이산화탄소), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Smooth Tube(평활관), Micro-fin tube(마이크로핀관), Pressure Drop(압력강하)

### Abstract

New alternative refrigerants have been developed due to the ozone layer depletion and global warming. For this reason, carbon dioxide is believed to be a promising refrigerant for use in air conditioners and heat pumps. Evaporative heat transfer characteristics and pressure drop of CO<sub>2</sub> with outer diameter of 5 mm in inclined (45°) smooth and micro-fin tubes have been investigated by the experiments with respect to several test conditions such as mass fluxes, heat fluxes, evaporation temperatures in this study. The inclined (45°) smooth and micro-fin tubes with length of 1.44 m were installed to measure the evaporative heat transfer coefficients of CO<sub>2</sub> and heat was supplied to the refrigerant by direct heating method where the test tube was uniformly heated by electricity. The tests were conducted at mass fluxes from 212 to 656 kg/m<sup>2</sup>s, heat fluxes from 15 to 60 kW/m<sup>2</sup> and evaporation temperatures from -10 to 20°C. The heat transfer coefficients of CO<sub>2</sub> are slightly increased with increasing mass flux, and the heat transfer characteristics in the inclined (45°) tubes are enhanced about 5~10% compared with those in horizontal or vertical tubes.

### 기호설명

$D_i$  : 관의 내경 (m)  
 $G$  : 질량유속 (kg/m<sup>2</sup>s)  
 $h$  : 열전달계수 (W/m<sup>2</sup>K)  
 $k$  : 열전도율 (W/mK)  
 $l$  : 시험부의 길이 (m)  
 $q''$  : 열유속 (kW/m<sup>2</sup>)  
 $r_i$  : 관의 내부 반경 (m)  
 $r_o$  : 관의 외부 반경 (m)

$T_{sat}$  : 포화 온도 (°C)  
 $T_{wi}$  : 내벽면 온도 (°C)  
 $T_{wo}$  : 외벽면 온도 (°C)  
 $x$  : 건도

### 1. 서 론

20세기 초부터 널리 사용되어왔던 CFC, HCFC 및 HFC 계열의 냉매들은 지구온난화(global warming)와 오존층파괴(ozone layer depletion)라는 심각한 환경오염의 주범으로 지목되고 있다. CFC, HCFC 및 HFC 계열의 냉매들은 뛰어난 화학적, 열역학적 성질을 가지고는 있지만 몬트리올의정서(1987)와 교토의정서(1997)같은 환경적

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : minskim@snu.ac.kr  
TEL : (02)880-8362 FAX : (02)880-0179  
\* 서울대학교 기계항공공학부

보호 규제에 의하여 미국, 유럽, 일본 등과 같은 선진국에서는 이산화탄소, 암모니아와 같은 천연 대체 냉매에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup>

이러한 환경적 규제들로 인하여 특히 주목을 받고 있는 것이 대표적인 환경친화적 자연냉매인 이산화탄소이다. 이산화탄소의 대표적인 특성으로는 기존 냉매에 비하여 높은 열용량을 가지고 있으며, 우수한 열역학적 성질과 환경친화성을 보이고 있다는 것이다. 이러한 이유들로 현재 냉동산업계에서 이산화탄소를 대체냉매로써 주목하고 있다. 또한, 이산화탄소는 오존층파괴지수(ODP)와 지구온난화지수(GWP)가 기존의 냉매와 비교할 수 없을 만큼 작다는 특성을 가지고 있다. 독성이 없으며, 무취, 비가연성이라는 특성도 대체 냉매로써의 가능성을 높이고 있다. 경제적인 측면에서는 대기중에서 이산화탄소를 추출할 수 있기 때문에 충분한공급량을 확보할 수 있고 가격이 저렴하며, 기술적인 측면에서는 단위 체적당 냉동용량이 현격하게 크므로 시스템의 소형화를 도모할 수 있다. 냉동시스템에 적용할 밀집형 열교환기에 대한 연구가 진행되고도 있다.<sup>(1)</sup>

현재 냉동 및 에어컨 시스템의 열교환기에 널리 사용되고 있는 대표적 열전달 촉진과 장치 중에 하나인 마이크로핀관(micro-fin tube)에서 이산화탄소의 증발열전달 과정에 관한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 가장 일반적으로 사용되고 있는 마이크로핀관은 외경이 4~15 mm 정도의 동으로 제작된 관에 50~70 개의 나선형의 핀이 관 내부에 6~30°의 각도(helix angle,  $\beta$ )로 형성되어 있고, 핀의 높이 0.1~0.25 mm 정도이며, 관 내벽과 핀의 각도(apex angle,  $\alpha$ )는 25~90° 정도의 기하학적 형상을 가지는 것이다. 이를 Fig. 1에 나타내었다. 마이크로핀관에 의한 열전달 촉진 기구로는 세 가지를 들 수 있다.<sup>(2)</sup> 마이크로핀에 의한 유효전열면적 증가와 표면장력에 의한 냉매 액상 성분의 핀과 핀사이 간극으로의 배수효과 및 마이크로핀에 의한 액막에 발생하는 난류효과가 그것이다.<sup>(3)</sup> 이렇게 향상된 열전달 성능은 동일한 외경을 가지는 평활관(smooth tube)과 비교를 이용한 향상계수(EF: enhancement factor)와 손실계수(PF: penalty factor)로 표현한다.<sup>(3)</sup>

이와 관련된 연구로써, Kim *et al.*<sup>(4)</sup>은 R-410A를 냉매로 이용하여 외경 9.52 mm 와 7 mm 평

활관과 마이크로핀관에서 증발열전달 특성에 관한 실험을 수행하였으며, 마이크로핀관의 열전달 촉진 기구에 의해서 열전달 성능이 각각 80~150% 와 10~60% 정도 증가함을 보였다. 또한, Kuo *et al.*<sup>(5)</sup>은 R-22를 이용하여 직경이 9 mm인 마이크로핀관 실험에서 증발열전달 성능이 2.2배 정도 증가함을 보였다. 이산화탄소를 이용한 증발열전달에 관한 실험도 활발하게 이루어져 왔다. Yoon *et al.*<sup>(6)</sup>은 이산화탄소를 이용하여 수평평활관(horizontal smooth tube)에서 증발열전달에 관한 실험을 수행하여 각각 다른 조건의 증발온도, 질량유속(mass flux)과 열유속(heat flux)에서 이산화탄소의 증발열전달계수를 측정하고 이에 따른 상관식을 제시하였다. Cho *et al.*<sup>(7)</sup>은 이산화탄소를 이용하여 각각 5 mm 및 9.52 mm 수평평활관과 수평마이크로핀관(horizontal micro-fin tube)에서 증발 열전달 실험을 다양한 조건에서 수행하였다. Cho *et al.*<sup>(7)</sup>은 연구를 통하여 각각 150~200% 와 170~210% 정도 열전달 성능이 향상됨을 보였으며, 압력강하는 마이크로핀관의 경우 약 1.2배 정도 증가한다고 보고하였다.

중력의 영향으로 인하여 관상부의 현격한 열전달 저하 현상을 보였던 기존의 수평관(horizontal tube)에만 국한된 연구에 이어서 Choi *et al.*<sup>(8)</sup>은 중력이 반경방향으로 동일하게 작용하는 수직관(vertical tube)에서 이산화탄소의 증발열전달 실험을 수행하였다. 하지만 이 연구는 국한된 질량유속과 열유속 조건에서 수행되었다는 측면에서 한계를 지니고 있다. Choi *et al.*<sup>(8)</sup>이 수행한 연구의 연장으로 Kim *et al.*<sup>(3)</sup>은 넓은 조건에서의 이산화탄소의 증발 열전달 실험을 5 mm 수직 평활관과 수직마이크로핀관에서 수행하였으며, 마이크로핀관에서 열전달계수가 111~207% 증가함을 보였고, 압력강하는 약 1.1배 정도 증가함을 실험적으로 나타내었다.

그러나 이산화탄소의 증발열전달 특성에 관한 선행 연구들은 주로 수평관과 수직관에만 국한되어 있는 것이 사실이다. 하지만 실제 열교환기 설계를 위해서는 경사관(45°)에 관한 연구가 반드시 필요하다. 또한, 중력의 작용에 의해 열전달 저하 현상이 발생하는 수평관과 중력이 반경방향으로 동일하게 작용하는 수직관의 성향이 혼합된 형태의 열전달 특성을 갖고 있는 경사관(45°)에서의 열전달특성에 관한 고찰은 대체 냉매로써의

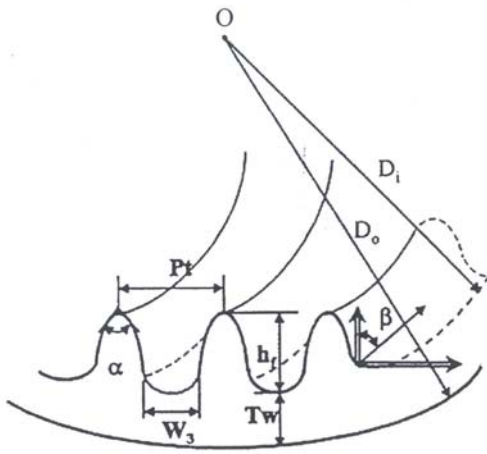


Fig. 1 Fin shape of a micro-fin tube

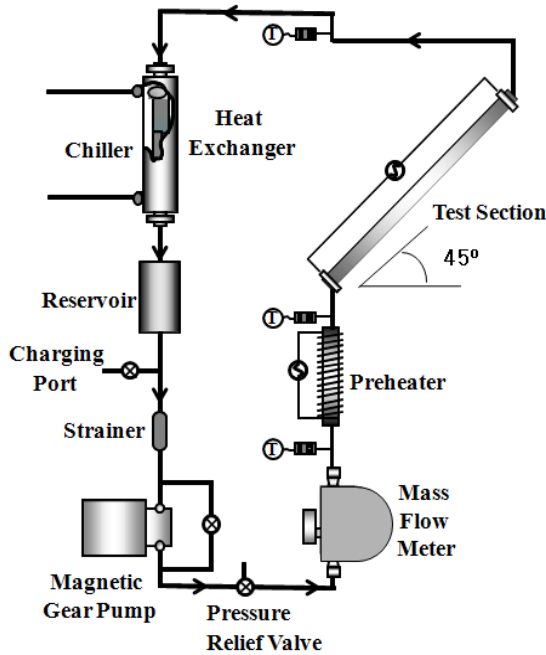


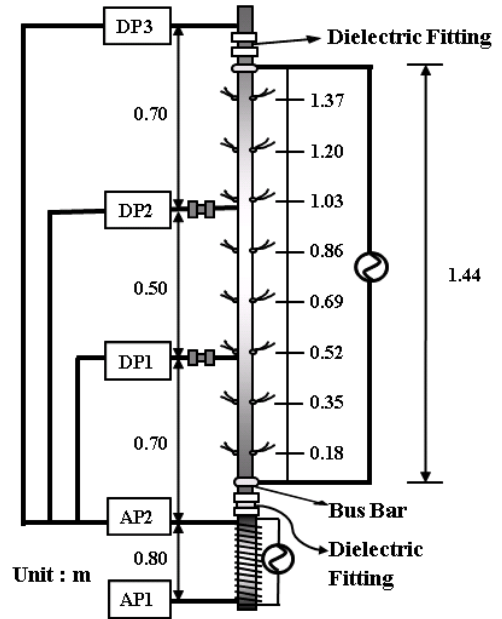
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

이산화탄소의 가능성을 구체화할 것으로 보인다. 따라서, 본 연구에서는 이산화탄소를 이용하여 각각 외경이 5 mm, 내경 4 mm, 길이 1.44 m로 동일한 경사평활관 및 경사마이크로핀관에서의 증발열전달 특성을 분석해보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 본 실험장치는 폐회



AP: absolute pressure transducer  
DP: differential pressure transmitter

Fig. 3 Schematic diagram of the test section

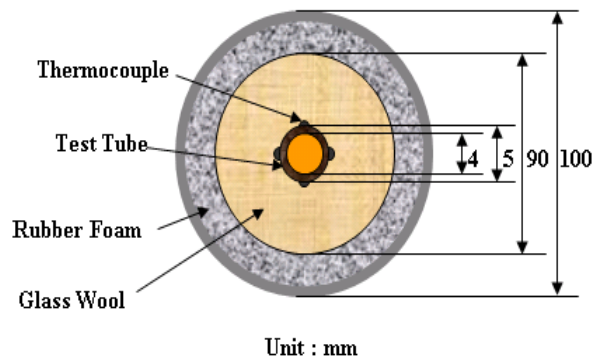
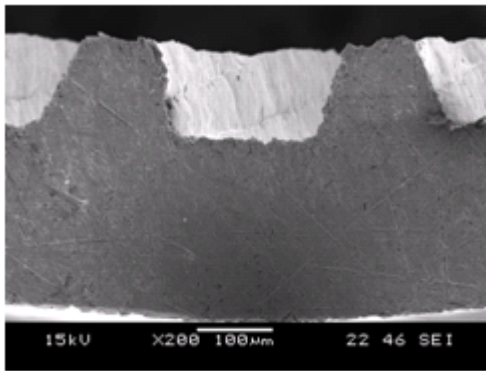


Fig. 4 Cross sectional view of test tube

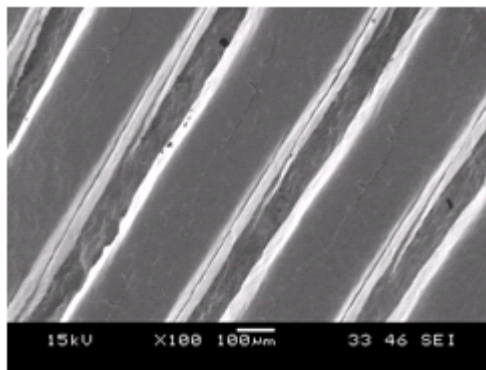
로를 이루고 있다. 펌프에서 방출되는 냉매는 질량유량계(mass flow meter), 예열기(preheater), 시험부(test section), 수액기(liquid receiver) 그리고 열교환기를 거쳐서 펌프로 들어오는 순환루프 내를 흐른다. 또한, 본 실험에 사용된 펌프는 오일이 필요 없으며 과냉상태인 액상의 냉매를 순환시키기 위하여 마그네틱 기어펌프를 사용하였으며, 질량유량계는 액상에서의 유량을 측정하기 위하여 예열기 전에 설치하였다. 유량계를 통과한 냉매는 시험부 입구에서 원하는 과냉도 및 건도 조절용으로 사용되는 예열기를 통과하도록 하였다. 예열기는 외경 5 mm의 동관을 사용하였으며, 동관 주위를 절연 테이프로 감싼 후 니크롬

**Table 1** Geometrical parameters of test tubes

Parameter	Smooth	Micro-fin
Outer diameter (mm)	5	5
Thickness (mm)	0.5	0.3
Fin-height (mm)	-	0.15
Helix angle $\beta$ ( $^\circ$ )	-	18
Number of fins	-	40
Expanded area ratio (micro-fin/smooth)	-	1.11



(a) Cross sectional view



(b) Longitudinal view

**Fig. 5** Configurations of the micro-fin tube

선으로 감아 유리섬유로 단열을 하였다. 니크롬 선 양단은 가변 전원 공급기에 연결하여 열량을 조절함으로써 시험부 입구의 건도를 조절하였다. 예열부를 통과한 냉매는 다시 직접 가열에 의해 열을 공급받아 증발과정을 거친 후 수액기로 들어가게 하였다.

**Table 2** Test conditions

Parameter	Value
Mass flow rate ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )	212, 318, 424, 530, 656
Heat flux ( $\text{kW/m}^2$ )	15, 30, 45, 60
Inlet temperature ( $^\circ\text{C}$ )	-10, -5, 0, 5, 10, 20

## 2.2 시험부

Fig. 3는 본 연구의 시험부에 대한 개략도를 나타낸다. 시험부는 각각 외경 5 mm, 유효 가열 길이 1440 mm 동관으로 제작한 평활관과 마이크로핀관이며, 압력 측정을 위한 압력탭, 관벽 온도 측정을 위한 T형 열전대와 시험부 양단의 절연을 위한 절연 피팅(dielectric fitting) 등으로 구성되어 있다. 1440 mm의 시험부는 열적입구효과(thermal entry length effect)를 무시할 수 있도록 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 상, 하, 좌, 우 4개씩 8곳에 부착하였다. 측정 온도의 오차를 최소화하기 위하여 온도 보정기(ice point reference)도 사용하였다. 또한 시험부로의 외부 열손실과 열유입을 최소화하기 위하여 Fig. 4에서와 같이 유리섬유로 단열시켰다. 또한, 본 실험에서 사용된 평활관과 마이크로핀관의 기하학적 형상을 Table 1에 나열하였으며, 마이크로핀관의 내부형상을 Fig. 5에 나타냈다. 그리고 본 실험에서는 증발 열전달 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자들인 냉매의 질량 유속을 다섯 가지 경우로, 외부에서 냉매로 가해지는 열유속을 네 가지 경우로, 냉매의 포화온도를 각각 여섯 가지 경우로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이를 Table 2에 나타내었다.

## 2.3 실험자료의 처리

열전달계수는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

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

**Table 3** Uncertainties of the measured and reduced parameters

Parameter	Uncertainty
Measurement of mass flux	0.3%
Measurement of heat flux	1.4%
Wall temperature	0.1°C
Evaporation temperature	0.1°C
Heat transfer coefficient	10.0%

$$T_{wi} = \frac{qr_o^2}{4k} \left(1 - \frac{r_i^2}{r_o^2}\right) + \frac{qr_o^2}{2k} \ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right) + T_{wo} \quad (2)$$

열전달 계수를 구하기 위해서는 열유속, 냉매의 포화온도, 시험부의 내벽면온도가 필요하다. 식 (1)에서  $q''$ 는 열유속,  $T_{wi}$ 는 측정된 외벽면 온도  $T_{wo}$ 를 1차원 열전도방정식을 고려하여 계산된 내벽면 온도,  $T_{sat}$ 는 압력을 측정 후 각각의 온도 측정지점에서의 압력을 추산하여 REFPROP<sup>(8)</sup>을 이용하여 구한 포화온도이다. 반경방향 평균 열전달계수는 윗면, 아랫면, 우측면, 좌측면 4곳에서 측정된 국소 열전달 계수로부터 평균한 식으로 계산하였다.

$$h = \frac{h_{top} + h_{bottom} + h_{right} + h_{left}}{4} \quad (3)$$

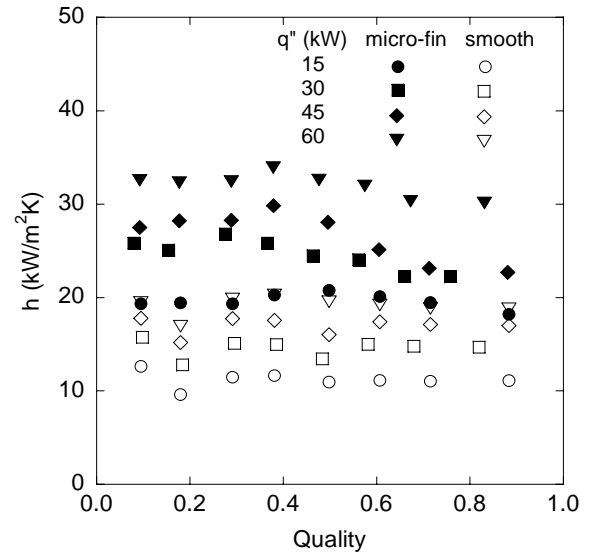
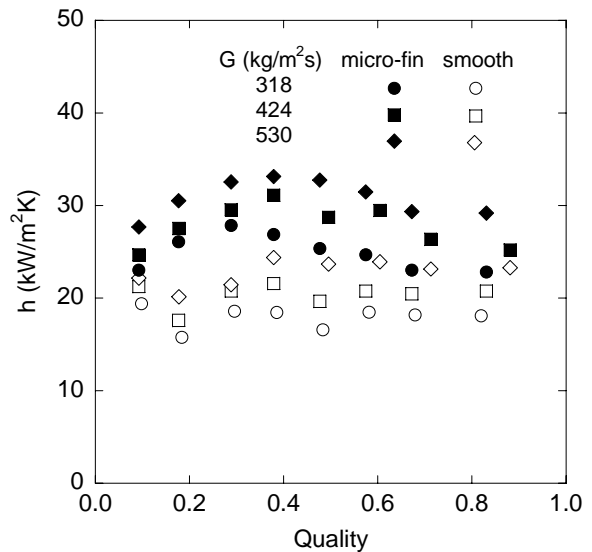
그리고 시험부에 가해진 열유속은 식 (4)와 같이 시험부에 공급된 열량  $Q$ 를 시험부의 내부 가열면적으로 나누어서 계산하였다.

$$q'' = \frac{Q}{\pi D_i l} \quad (4)$$

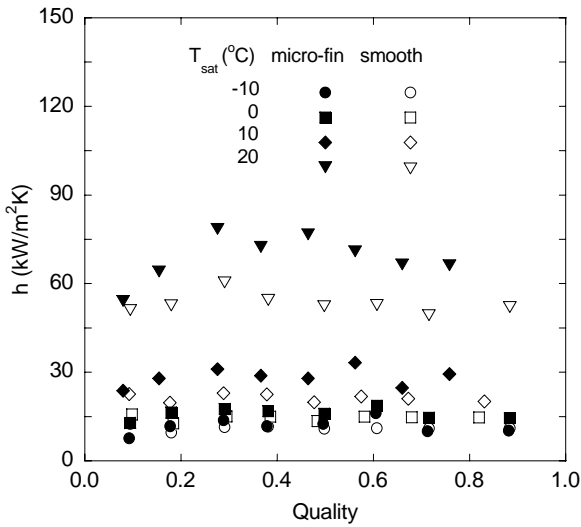
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 장치 검증

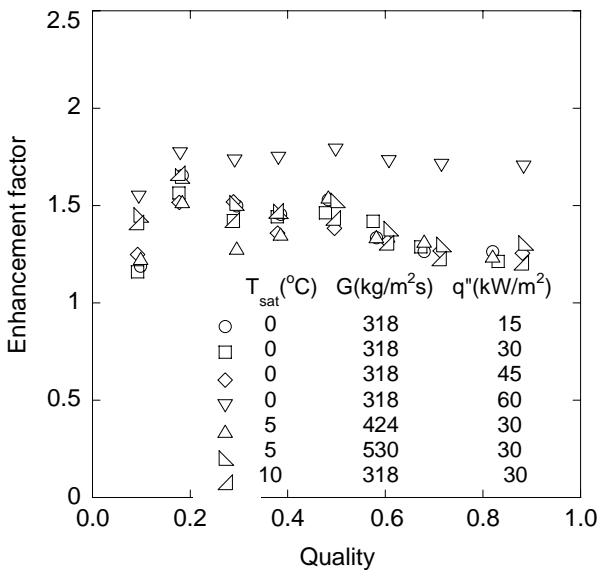
실험장치를 검증하기 위해서 R-22를 이용하여 예비실험을 수행하였다. 각 시험부의 정확도를 검증하기 위하여 시험부 에너지 평형을 검증해 보았다. 이는 과냉상태의 냉매를 주어진 열유속

**Fig. 6** Variation of heat transfer coefficients versus mass quality for different heat fluxes at the mass flux of 318 kg/m<sup>2</sup>s and the evaporation temperature of -5°C**Fig. 7** Variation of heat transfer coefficients versus mass quality for different mass fluxes at the heat flux of 30 kW/m<sup>2</sup> and the evaporation temperature of 0°C

과 질량유속 조건에서 시험부로 흘러 보내고 시험부 입출구 온도를 측정하여 분석함으로써 시험부로 공급된 열량과 유체가 얻은 열량을 비교하였다. 27개의 조건에서 R-22를 이용하여 얻은 결과를 통해 공급된 열량과 냉매가 얻은 열량은 평균 약 5.1%의 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 측정된 열전달 계수를 기존의 열전달 상관



**Fig. 8** Variation of heat transfer coefficients versus mass quality for different evaporation temperatures at the mass flux of 318 kg/m<sup>2</sup>s and the heat flux of 30 kW/m<sup>2</sup>

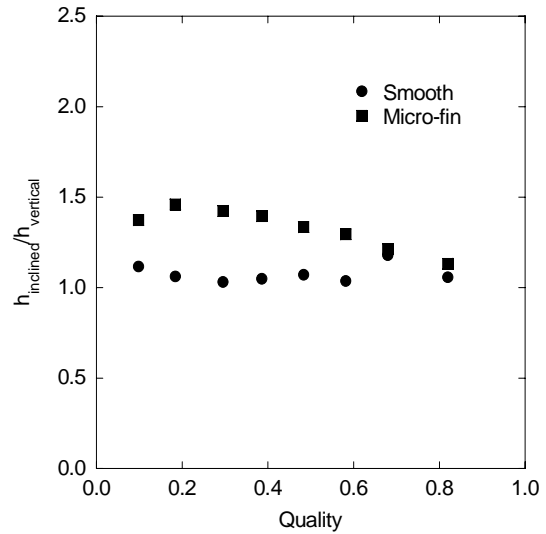


**Fig. 9** The effect of mass flux, heat flux, and evaporation temperature on enhancement factor

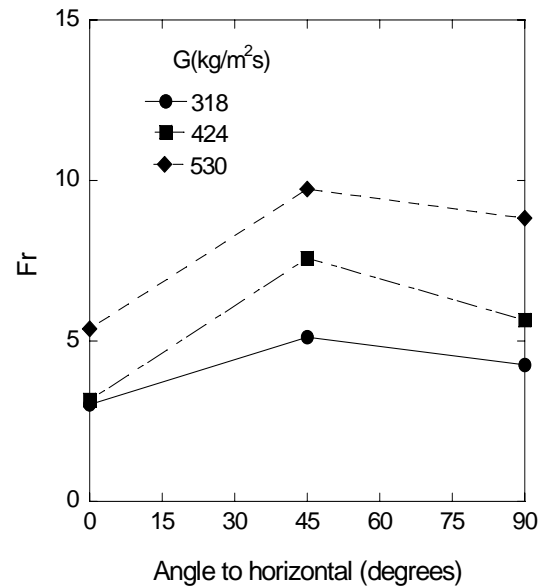
식 중 하나인 Gnielinski<sup>(9)</sup>식과 비교해본 결과 절대평균오차가 10.0% 정도로 신뢰할만한 수준의 실험장치 정확도를 보였다. 또한 Table 3에는 실험에서 얻은 변수들에 대한 측정 오차를 분석한 값들을 나타내었다.

### 3.2 이산화탄소 증발열전달 특성

수평관에서 이산화탄소의 일반적인 증발열전달

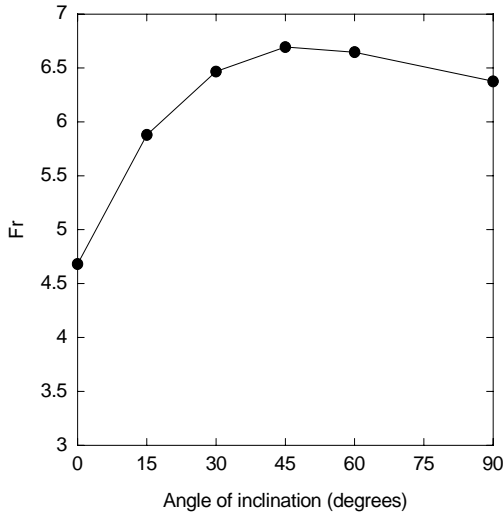


**Fig. 10** The comparison of heat transfer coefficients between inclined and vertical tubes

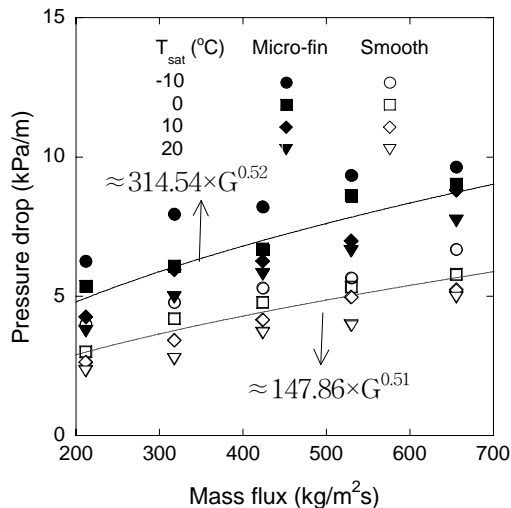


**Fig. 11** Rise velocity data in this study

특성은 건도가 증가함에 따라서 기존 냉매보다 현격하게 작은 이산화탄소의 표면장력과 점성으로 인하여 액체막(liquid layer)의 국소파열(local break-down)이 발생하기 때문에 증발열전달계수가 감소하는 경향을 갖는다. 또한, 수평관에서 증발과정의 온도분포를 살펴보면 중력의 영향으로 인하여 관 상부의 온도가 건도 증가에 따라서 현격하게 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 증발이 진행됨에 따라서 액막(liquid film)의 두께가 얇아져서 건도가 더 증가함에 따라서 액막이 쉽게 파열되는 것도 확인할 수 있다.<sup>(7)</sup> 이러한 액



**Fig. 12** Variation of calculated Froude number for different angle of inclination by existing concept (Carew *et al.*, 1995)



**Fig. 13** Pressure drop as a function of mass flow rate in an inclined smooth and micro-fin tubes

막의 파열로 인하여 수평관에서 이산화탄소의 증발열전달계수가 현격하게 감소하는 것이다. 그러나, 경사관에서는 건도가 증가함에 따라서 발생하는 열전달 감소는 수평관(horizontal tube)과 수직관(vertical tube)의 양에 비해서 굉장히 작다. 경사관에서는 열전달감소의 주원인인 중력의 영향으로 인하여 관 상부에 기상이 채워지면서 드라이아웃(dry-out)을 발생시키는 효과가 없기 때문이다. Carew 등<sup>(10)</sup>은 45° 경사관에서 버블(slug bubble)의 속도가 동일한 실험 조건에서 수행된 수평관과 수직관에 비해서 증가한다고 보고하였다. 따라서,

이러한 버블속도(bubble velocity)의 증가로 인하여 경사관에서의 열전달계수가 증가함을 보였다. 45° 경사관에서의 이러한 현상은 증발초기과정에서 버블속도를 증가시키기 때문에 열전달 촉진 메카니즘으로 작용하는 난류효과를 극대화시키므로써 동일한 조건에서의 수평관과 수직관에서보다 열전달 성능을 향상시키게 되는 것이다.

이에 열유속, 질량유속, 포화온도에 따른 증발열전달계수의 변화를 Figs. 6-8에 나타냈다. 선행연구되었던 수평관과 수직관에서의 이산화탄소의 증발열전달 특성과 동일하게 45° 경사관에서도 열유속, 질량유속, 포화온도가 증가함에 따라서 이산화탄소의 증발열전달계수가 증가하였다. 하지만 열유속, 질량유속, 포화온도의 증가에 따른 이산화탄소의 증발열전달계수의 증가폭은 난류효과에 의해 열전달 성능이 크게 향상되는 45° 경사마이크로핀관에서 더 뚜렷하게 나타났다. 이는 증가된 버블속도의 영향으로 인하여 마이크로핀관에서 난류효과가 극대화되기 때문에 결과적으로 이산화탄소의 증발열전달계수가 더 큰 폭으로 증가했다고 판단된다.

Fig. 9는 45° 경사마이크로핀관에서 이산화탄소의 증발열전달계수가 동일한 외경과 동일한 실험 조건에서 수행된 45° 경사평활관에서의 열전달계수보다 어느 정도 증가하였는지를 향상계수(enhancement factor)를 통하여 나타내었다. Fig. 9에서와 같이 다양한 열유속, 질량유속, 포화온도에 따른 45° 경사마이크로핀관에서의 성능계수는 약 1.1-1.7정도이다. 이 값은 동일한 조건에서 수행된 수평관에서의 성능계수(1.7-2.1)보다는 작지만 45° 경사관에서 이산화탄소의 증발열전달계수의 절대값이 수평관에서의 열전달계수의 절대값보다 크기 때문에 열전달 성능이 45° 경사관에서 향상되었다고 할 수 있다.<sup>(7)</sup>

Fig. 10은 동일한 실험 조건에서의 45° 경사관과 수직관에서의 이산화탄소의 증발열전달계수의 비를 나타낸다. Fig. 10에서와 같이 45° 경사평활관에서는 약 1.1배 정도 열전달 성능이 향상되었던 반면에, 45° 경사마이크로핀관에서는 약 1.2-1.5 배 정도 열전달 성능이 향상되었다. 이는, 45° 경사관에서 발생하는 버블속도의 향상이 마이크로핀관에서 난류효과를 향상시켰음을 나타낸다.

본 실험에서 난류효과를 향상시켰던 45° 경사관에서 버블 속도의 증가를 확인하기 위하여 Fig.



11에 세 가지 질량 유속과 관의 경사에 따른 버블 속도의 증가를 유체의 속도 성분을 포함하는 무차원수(non-dimensional number)를 이용하여 나타내었다. Fig. 11을 통하여 Carew 등<sup>(10)</sup>이 제안했던 결과와 동일하게 본 연구에서도 45° 경사관에서 버블속도가 수평관(horizontal tube)과 수직관(vertical tube)에 비해서 증가함을 확인하였다. 또한, 본 실험에서 얻은 결과가 타당함을 확인하기 위하여 Carew 등<sup>(10)</sup>이 제안했던 식 (5)를 이용하여 관의 경사에 따른 버블속도를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12도 본 실험에서 얻은 결과와 동일하게 45° 경사관에서 버블속도가 최대가 됨을 나타냈다.

$$Fr = \frac{u_1}{\sqrt{gD}} = \sqrt{\frac{2(1-\varepsilon)}{(1+\varepsilon)} \left[ \frac{V}{AD} \sin\theta - \left[ \varepsilon^2 \left( 1 - \frac{4}{3\pi} \right) + \varepsilon \left( \frac{4}{3\pi} - \frac{3}{2} \right) \right] \cos\theta \right]} \quad (5)$$

식 (5)에서  $u_1$ 은 유체속도,  $\varepsilon$ 은 Carew *et al.*<sup>(10)</sup>이 제안한 관의 경사에 따른 상수,  $\theta$ 는 관의 경사를 나타낸다.

### 3.3 압력강하

Fig. 13은 45° 경사평활관과 45° 경사마이크로핀관에서 질량 유속과 포화온도 변화에 따른 압력강하를 나타낸다. 마이크로핀관에서의 압력강하가 전반적으로 평활관에서의 압력강하보다 크게 나타났다. 각각의 경우에서 질량유속이 증가함에 따라서 압력강하가 증가하는 경향을 보였으며, 이와 반대로 포화온도가 증가할수록 압력강하가 감소하는 경향을 보였다. 경사평활관에서 압력강하는 147.86G<sup>0.51</sup>에 비례하여 증가하였으며, 경사마이크로핀관에서는 314.54G<sup>0.52</sup>에 비례하여 압력강하가 증가하였다. 이는 Kim *et al.*<sup>(3)</sup>이 동일한 실험 조건에서 수행한 수직평활관(G<sup>1.51</sup>)과 수직마이크로핀관(G<sup>1.54</sup>)에서의 압력강하보다 상대적으로 작은 값을 나타내었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 45° 경사평활관과 45° 경사마이크로핀관에서 수직상향으로 유동하는 이산화탄소

의 증발열전달 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 수평관(horizontal tube)관에서는 건도가 증가함에 따라서 증발열전달계수가 약 50% 정도 감소하였으며, 수직관(vertical tube)에서는 고건도 영역으로 갈수록 증발열전달계수가 약 20% 감소하였다. 하지만, 45° 경사관에서 건도가 증가함에 따라서 발생하는 열전달 감소는 약 10% 정도로 선행 연구되었던 수평관과 수직관에서의 열전달 감소보다 낮은 경향을 보였다.

(2) 45° 경사관에서 증가하는 버블속도(bubble velocity)로 인하여 45° 경사관 내부에서 난류효과가 증가하여 동일한 실험 조건에서 수행된 수직관에 비하여 이산화탄소의 증발열전달계수가 최대 1.5배까지 증가하였다. 또한, 45° 경사마이크로핀관에서는 45° 경사평활관에서 보다 열전달 성능이 약 1.1-1.7배 정도 향상되었다.

(3) 45° 경사평활관과 45° 경사마이크로핀관에서 압력강하는 각각 147.86G<sup>0.51</sup>와 314.54G<sup>0.52</sup>에 비례하여 증가하였으며, 포화온도가 증가할수록 압력강하가 감소하는 경향을 가졌다.

## 후 기

본 연구는 교육인적자원부 BK 21 프로그램 및 마이크로열시스템연구센터의 지원으로 수행되었다. 또한 과학기술부(NRL) 및 삼성전자의 지원에도 감사하는 바이다.

## 참고문헌

- (1) Cho, J. M., Kim, Y. J. and Kim, M. S., 2008, "Experimental Studies on the Evaporative Heat Transfer Characteristics of CO<sub>2</sub>/Propane Mixtures in Horizontal Smooth and Micro-fin Tubes," *KSME International Journal*, In press, Accepted Manuscript.
- (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 Winter Annual Conference*, pp. 50~55.
- (3) 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. Refrig.*, *In press, Accepted Manuscript*.
- (4) Kim, Y. C., Seo, K. J. and Chung, J. T., 2002, "Evaporation Heat Transfer Characteristics of R-410A in 7 and 9.52 mm Smooth/Micro-fin Tubes," *Int. J. Refrig.*, Vol. 25, pp. 716~773.
- (5) Kuo, C. S. and Wang, C. C., 1996, "In-tube Evaporation of HCFC-22 in a 9.52 mm Micro- fin/ Smooth Tube," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 2559~2569.
- (6) Yoon, S. H., Cho, E. S., Hwang, Y. W., Kim, M. S., Min, K. D. and Kim, Y. C., 2004, "Characteristics of Evaporative Heat Transfer and Pressure Drop of Carbon Dioxide and Correlation Development," *Int. J. Refrig.*, Vol. 27, pp. 111~119.
- (7) 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 mm and 9.52 mm," *Int. J. Refrig.*, Vol. 30, pp. 986~994.
- (8) Lemmon, E. W., McLinden, M. O., and Huber, M. L. 2002, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), NIST Standard Reference Database 23, Version 7.0, National Institute of Standards and Technology, Maryland, USA.
- (9) Gnielinski, V., 1976, "New Equations for Heat and Mass Transfer in Turbulent Pipe and Channel Flow," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 16, pp. 359~368.
- (10) Carew, P. S., Thomas, N. H., and Johnson, A. B., 1995, A Physically Based on Correlation for the Effects of Power Law Rheology and Inclination on Slug Bubble Rise Velocity, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 21, pp. 1091~1106.