

## 수평관내의 CO<sub>2</sub>의 증발 열전달에 관한 연구

장승일<sup>+</sup>·최선목<sup>++</sup>·김대희<sup>+++</sup>·오후규<sup>++++</sup>

### Study on the Evaporation Heat transfer of CO<sub>2</sub> in a Horizontal tube

Seong-II Jang<sup>+</sup>, Sun-Muk Choi<sup>++</sup>, Dae-Hui Kim<sup>+++</sup>, Hoo-kyu Oh<sup>++++</sup>

**Abstract :** The experiments were conducted without oil in a closed refrigerant loop which was driven by a magnetic gear pump. The main components of the refrigerant loop are a receiver, a variable-speed pump, a mass flow meter, a pre-heater and evaporator(test section). The test section was made of a horizontal stainless steel tube with the inner diameter of 4.57 mm, and length of 4 m. The experiments were conducted at mass flux of 200 to 700 kg/m<sup>2</sup>s, saturation temperature of 0℃ to 20℃, and heat flux of 10 to 30 kW/m<sup>2</sup>. The test results showed the evaporation heat transfer of CO<sub>2</sub> has great effect on more nucleate boiling than convective boiling. The evaporation heat transfer coefficients of CO<sub>2</sub> are highly dependent on the vapor quality, heat flux and saturation temperature. In comparison with test results and existing correlations, correlations failed to predict the evaporation heat transfer coefficient of CO<sub>2</sub>, therefore, it is necessary to develop reliable and accurate predictions determining the evaporation heat transfer coefficient of CO<sub>2</sub> in a horizontal tube.

**Key words :** Carbon dioxide(이산화탄소), Evaporation heat transfer(증발열전달), Heat exchanger(열교환기), Natural refrigerant(자연냉매)

### 1. 소개

최근 대체 냉매로 주목 받고 있는 CO<sub>2</sub>는 지구온난화지수와 오존층과 파괴지수가 낮으며, 단위체적당의 열용량이 높으며, 우수한 열역학적 물성치를 가지고 있다. 따라서, 여러 선진국들과 국내에서 활발한 연구가 진행 중이다. CO<sub>2</sub>는 높은 임계 압력과 낮은 임계온도를 가지며, 증발과정이 임계점에 가깝기 때문에 비체적, 비열, 점성계수, 표면장력 등의 물성치가 크게 변화한다. 이로 인해서, 기존 냉매와는 상당히 다른 특성을 나타낸다<sup>1)</sup>. 따라서, 본 논문에서는 4.57mm 관에서 CO<sub>2</sub>의 증발열전달 특성을 분석하고 기존 상관식과의 비교·검토를 통해 적용 가능성을 분석함으로써 CO<sub>2</sub>용 증발 열교환기의 기초설계 자료를 제시하고자 한다.

### 2. 실험장치와 방법

실험장치는 시험부와 예열기, 응축기, 질량유량계, 마그네틱 기어 펌프로 구성되었으며, 온도와 압력의 측정은 시험부에 연결된 T타입 열전대와 절대압계, 차압계로 측정된다. 시험부는 내경 4.57mm, 길이 4m의 스테인레스 스틸관으로 구성되었다.

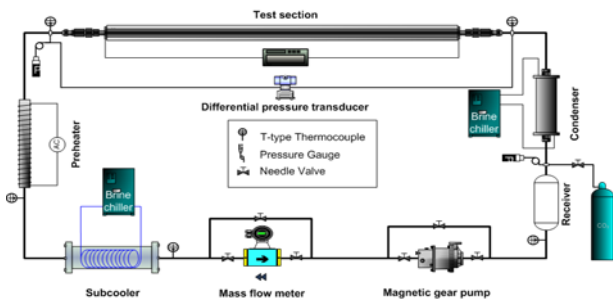


Fig. 1. Schematic of Experimental apparatus.

시험부는 균일한 열유속을 공급하기 위해 DC파워서플라이로 가열하였다. 측정은 시험부를 등간격으로 나눈 0.2m의 19개 국소 구간으로 이루어졌으며, 각 국소구간의 상하좌우 4개의 관외벽면과 입 출구에서 온도와 압력이 측정되었으며 시험부의 양끝을 전기적으로 절연하기 위해 절연 피팅을 사용하였다.

Table. 1. Test conditions

Refrigerant	R-744(CO <sub>2</sub> )
T <sub>sat</sub> [°C]	0, 5, 10, 20
G <sub>re</sub> [kg/m <sup>2</sup> s]	200 ~ 700
D <sub>i</sub> [mm]	4.57
q [kW/m <sup>2</sup> ]	10, 20, 30

### 3. 실험조건 및 데이터정리

냉매의 순환은 액상의 냉매를 마그네틱 기어펌프에서 순환시키게 되며, 펌프를 통과한 냉매는 질량유량계에서 유량과 밀도가 측정된다. 질량유량계를 통과한 냉매는 서브쿨러와 예열기를 거쳐 건도가 조절되어 시험부로 들어가게 된다. 시험부에서 냉매는 DC 파워 서플라이에서 공급된 열량에 의해 증발과정을 거치게 되고, 응축기에서 브라인과의 열교환을 통해 응축된다. 응축된 냉매는 수액틀을 거쳐서 펌프로 들어가 재순환하게 된다. 실험조건의 물성치는 REFPROP(v6.2)로 계산되었다. 데이터의 정리를 위한 열전달 계수는 다음 식과 같이 정의한다.

+ 장승일, (부경대학교 냉동공조공학과), E-mail: jsi26@hotmail.com, Tel: 051)621-6802  
 ++ 최선목, 부경대학교 냉동공조공학과  
 +++ 김대희, 부경대학교 냉동공조공학과  
 ++++ 오후규, 부경대학교 냉동공조공학과

$$h = \frac{q}{T_{w,i} - T_{sat}} \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 열유속,  $T_{w,i}$ 는 관내벽면 온도로서 측정된 관외벽면 온도로부터 1차원 열전도 방정식에 의해 계산되며  $T_{sat}$ 는 냉매의 포화온도이다. 각 구간에서 벽면 온도는 관의 상부와 양측부, 하부에서 측정된 온도의 평균값을 사용하였다.

#### 4. 실험결과

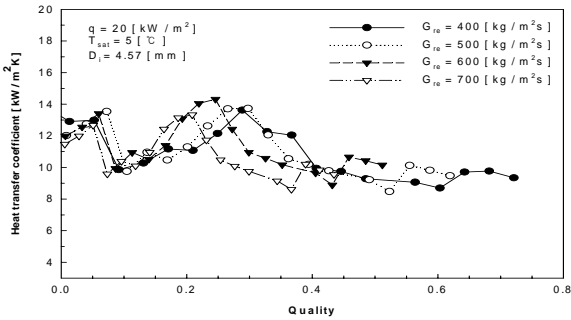


Fig. 3 Variation of Heat transfer coefficient with different mass flux

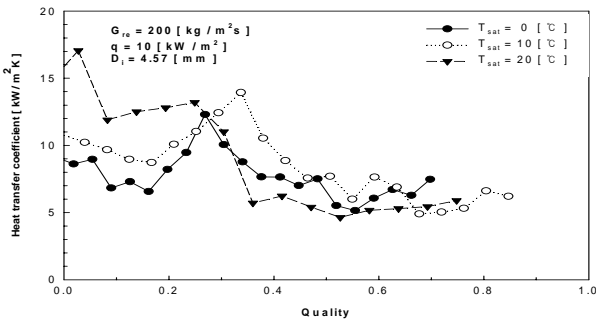


Fig. 4 Variation of Heat transfer coefficient with different saturation temperature

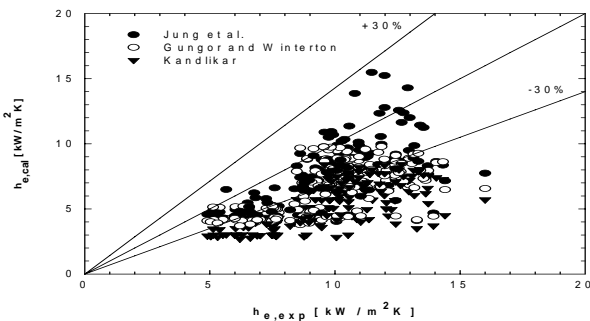


Fig. 5 Comparison between measured and calculated heat transfer coefficients.

Fig. 3과 같이 CO<sub>2</sub>의 국소 증발 열전달 계수는 질량

유속증가에 대해 거의 변화하지 않으며, 드라이 아웃 발생 지점이 상대적으로 저건도 영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 CO<sub>2</sub>의 경우 액상의 표면장력과 점성계수가 낮고, 기상과 액상의 밀도비가 낮기 때문에 전반적으로 핵비등의 영향이 지배적이며, 상대적으로 질량유속의 영향이 작게 나타난다.

Fig. 4에서는 포화온도가 증가함에 따라 저건도 영역의 열전달계수가 증가하며, 고건도 영역에서는 열전달계수 차이가 작아짐을 알 수 있다. 이것은 CO<sub>2</sub>의 경우 압력이 증가함에 따라 표면장력이 작아지게 됨으로, 핵발생과 증기 기포 성장에 필요한 과열도가 줄어들게 되어 핵비등 열전달을 활성화 시키게 된다.<sup>(1)</sup> 따라서, 낮은 점성계수와 함께 낮은 표면장력에 의한 과열도의 감소로 대류비등의 영향보다 저건도 영역에서의 핵비등의 영향이 상대적으로 강하게 나타나는 것으로 판단된다.

대표적인 증발 열전달 예측 상관식으로는 Jung 등(1989)<sup>(3)</sup>, Gungor and Winterton(1987)<sup>(4)</sup>, Kandlikar(1990)<sup>(5)</sup> 등이 있다. Fig. 5에서와 같이 상관식으로 예측한 대부분의 값이 과소 예측된다는 것을 알 수 있다. 상관식들 중에서 실험을 통해 측정된 값과 가장 근접한 것은 Jung(1989)<sup>(3)</sup> 등의 상관식으로 절대평균 오차가 25.1%였다.

#### 4. 결론

(1) 질량유속은 증발열전달 계수에 거의 영향을 미치지 않았다. 질량유속이 증가할수록 드라이아웃 발생 지점이 저건도 영역으로 이동하였다.

(2) 포화온도가 증가함에 따라서 증발열전달 계수는 증가하였다. 이것은 CO<sub>2</sub> 냉매의 낮은 점성계수와 포화온도의 증가로 인해 표면장력이 감소함에 따라 과열도가 줄어들어 핵비등이 활성화 되는 것이 그 원인으로 판단된다.

(3) 수평관내 CO<sub>2</sub>의 증발열전달에 대한 실험결과를 Jung<sup>(3)</sup> 등, Gungor and Winterton<sup>(4)</sup>, Kandlikar<sup>(5)</sup>의 상관식과 비교한 결과 Jung 등의 상관식이 절대평균오차 25.1%로 상대적으로 좋은 일치를 보였다.

#### 참고문헌

1. Pettersen J. Flow vaporization of CO<sub>2</sub> in microchannel tubes. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway; 2002.
2. Bredeesen A, Hafner A, Pettersen J, Aflekt K. Heat transfer and Pressure drop for in-tube evaporation of CO<sub>2</sub>. International Conference on Heat Transfer Issues in Natural Refrigerants, College Park, MD; 1997. p. 1-15.
3. Jung, D.S, McLinden, M., Randermacher, R., and Didion, D., 1989, "A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 9, pp. 1751-1764.
4. Gungor, K. E. and Winterton, R. H. S., 1987, Simplified General Correlation for Flow Saturated Boiling and Comparisons of Correlations with Data, Chem. Eng. Res, Des., Vol. 65, pp. 148-156.
5. Kandlikar, S. G., 1990, "A general correlation for saturated two-phase flow boiling horizontal and vertical tubes", Trans. ASME, Vol. 112, pp. 219-228.