

자연냉매 프로판을 이용한 수평세관 증발기의 열전달 특성에 관한 연구

Study on Heat Transfer Characteristics of Evaporator with Horizontal Small Diameter Tubes using Natural Refrigerant Propane

구 학 근
H. K. Ku

(접수일 : 2010년 6월 4일, 수정일 : 2010년 6월 17일, 채택확정 : 2010년 6월 22일)

Key Words : Evaporation Heat Transfer(증발열전달), Heat Flux(열유속), Natural Refrigerant(자연냉매), Pressure Drop(압력강하), Propane(프로판)

Abstract : The evaporation heat transfer characteristics of propane(R-290) in horizontal small diameter tubes were investigated experimentally. The test tubes have inner diameters of 1 mm and 4 mm. Local heat transfer coefficients were measured at heat fluxes of 12, 24 kW/m², mass fluxes of 150, 300 kg/m²s, and evaporation temperature of 15 °C. The experimental results showed that the evaporation heat transfer coefficient of R-290 has an effect on heat flux, mass flux, tube diameter, and vapor quality. The evaporation heat transfer of R-290 has an influenced on nucleate boiling at low quality and convective boiling at high quality. The evaporation heat transfer coefficient of R-290 increases with decreasing inner tube diameter. And the evaporation heat transfer coefficient of R-290 is about 1~3 times higher than that of R-134a.

1. 서 론

sat : saturation
w : tube wall

D : tube diameter, m
G : mass flux, kg/m²s
M : mass flowrate, kg/s
h : heat transfer coefficient, W/m²K
q : heat flux, kW/m²
P : pressure, Pa
T : temperature, °C
x : quality

1. 서 론

현재까지는 CFC계의 대체냉매로 비공비혼합냉매나 HFC계 냉매가 권장되고 있으나 HFC계 냉매도 대기권에서 태양 광선에 의해 분해되어 산과 독성 물질을 형성하는 것으로 보고되고 있다¹⁾.

따라서 새로이 개발되는 대체냉매는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 독성이 없고, 가연성이 없으며, 기존의 냉매와 열역학적 성질이 비슷해야 한다. 이러한 관점에서 기존의 냉매 대신에 ODP(Ozone Depletion Potential)와 GWP(Global Warming Potential)가 0인 자연냉매의 물성치 및 이들 자연냉매를 사용하는 시스템에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 자연냉매로서는 암모니아(NH₃), 탄화수소계(프로판, 부탄 등), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂), 헬륨(He), 물(H₂O), 공기 등이 있다. 이들 중에서 프로판, 부탄 등의 탄화수소계 냉매는 값이 싸고, 사

Subscripts

e : evaporation
exp: experimental
i : inner
in : inlet
o : outer
re : refrigerant

구학근(교신저자) : 동명대학교 냉동공조공학과
E-mail : hgkur@tu.ac.kr

용이 간편하며, 일반적인 광물질 윤활유와 잘 혼합되지만, 최근까지는 가연성 때문에 유럽을 제외한 일본 및 미국 등 다른 선진국들에 의해 탄화수소계 냉매의 사용이 거의 무시되어 왔다. 그러나 지구 온난화 문제가 심각하게 거론됨으로써 온난화 지수가 낮은 탄화수소계 냉매의 사용이 적극적으로 검토되고 있다. 또 가정용 냉장고의 경우 탄화수소계 냉매의 충전량이 일반적인 CFC계 냉매의 절반 정도이므로 가연성에 의한 폭발의 위험은 거의 없는 것으로 밝혀졌다^{2~4)}.

탄화수소계 냉매인 프로판(R-290)의 증발열전달에 관한 종래의 연구를 살펴보면, 우선 Wen 등⁵⁾은 R-290, R-600 및 R-290/R-600 혼합냉매에 대한 열전달 실험에서 R-134a 보다 우수한 열전달 특성을 밝혔으며, 이를 이용한 새로운 상관식을 제시하였다. Jung 등⁶⁾은 전열축진관내에 R-290, R-600a, R-600 냉매를 사용하여 핵비등 열전달에 대해 연구한 결과, 이와 같은 냉매는 압력강하의 증가와 함께 핵비등 열전달 계수도 증가한다고 하였다. Cho 등⁷⁾은 5 mm 평활관내 R-32/R-290 혼합냉매의 성분비에 따른 증발열전달 특성에 대한 실험적 연구를 통해 R-32의 혼합비율이 증가할수록 R-290의 순수 단일냉매에 비해 약간 증가한다고 보고하였다. 이와 같은 종래의 연구들^{8~10)}은 대부분 5 mm 이상의 관경에 대한 것으로 5 mm 이하의 세관내 증발열전달에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 R-290을 비롯한 탄화수소계 냉매의 세관내 증발열전달에 미치는 관경의 영향 및 열전달 상관식에 대한 연구는 대단히 부족하다.

따라서, 본 논문은 탄화수소계 자연냉매인 R-290 용 열펌프 시스템에서 가장 중요한 요소기기인 증발기의 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하는 것이다. 이를 위해 R-290용 열펌프를 비롯한 각종 냉동·공조장치에 가장 일반적으로 적용가능한 수평세관내 R-290 냉매의 증발과정 중에 열전달 특성에 대해서 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 마그네틱 기어펌프(①)와 질량유량계(②), 냉매유량 조절밸브(③), 열교환기(④), 예열기(⑤), 사이트 글라스(⑥), 시험부(⑦), 보조탱크(⑩), 응축기(⑪)로 구성되어 있다.

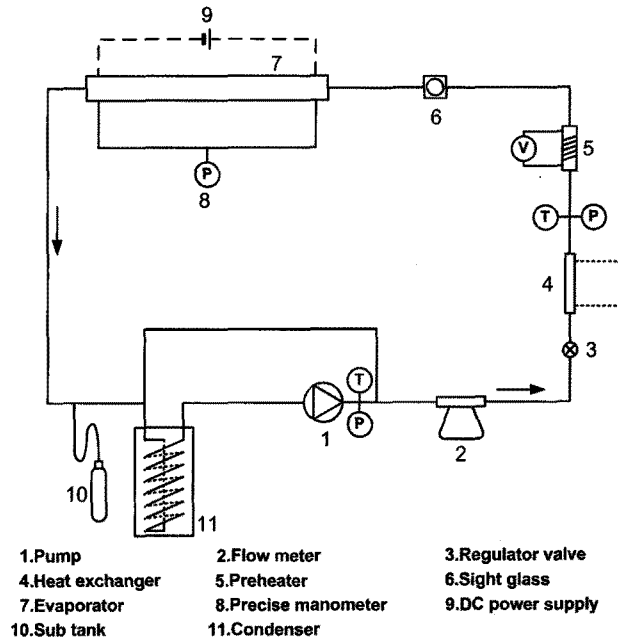


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

냉매의 순환과정을 살펴보면, 보조탱크에 액상으로 충전된 냉매액은 응축기로 들어간다. 응축기에 모인 냉매액은 냉매펌프에 의하여 전자식 질량유량계로 들어간다. 질량유량계에서 유량이 측정된 냉매액은 전기히터(⑤)와 열교환기(④)에 의해 가열되어 일정 건도를 가진 냉매증기로 된다. 예열기를 나온 냉매증기는 시험부인 증발기(⑦)로 유입되어 증발과정을 거친 후, 응축기에서 응축이 완료된 냉매액은 냉매펌프에서 의해 재순환된다.

Table 1에 나타낸 것처럼, 증발 시험부는 내경 1 mm와 4 mm인 스테인레스관(SUS316)을 사용하였으며, 파워서플라이에서 공급되는 전류가 시험에 사용된 관에 직접 가해지는 직접 가열방식으로 되어 있다. 증발기의 길이는 각각 1,000 mm와 4,000 mm이며, 가능한 일정 열유속 조건을 구현할 수 있도록 이음매 없는 관(seamless tube)을 사용하였다. 관의 벽면 온도를 측정하기 위해서 증발기 입구와 출구에서 T형 열전대를 설치하고, 증발기의 중간 부분은 상부, 하부, 측부(좌우)의 4개 지점에 부착하여 증발관 외벽면의 온도를 측정하였다. 또한, 냉매온도는 증발기 입출구에서 T형 열전대를 설치하여 측정하였다. 압력을 측정하기 위해 시험부 입·출구에서 압력센서와 차압계를 각각 설치하여 측정하였다. 실험데이터는 장치가 정상상태에 도달하였을 때 온도, 압력과 질량유량을 각각 측정하였다. Table 2는 실험조건을 정리한 것이다. 본 실험결과에 대한 불확실도는 실험조건에 의존하여 변화기 때문에 이에

Table 1 Specification of small diameter tubes

Tube material : SUS316		
D _i , [mm]	D _o , [mm]	L, [mm]
1.0	2.0	1,000
4.0	5.0	4,000

Table 2 Test range of experiment

Refrigerant	R-290(Propane)
q _{re} , [kW/m ²]	12, 24
G _{re} , [kg/m ² s]	150, 300
T _{e,sat} , [°C]	15

Table 3 Parameters and estimated uncertainties

Parameters	Uncertainty
T, [°C]	± 0.1°C
P, [kPa]	± 0.3kPa
M, [kg/s]	± 2%
Q, [kW]	± 3%
h, [kW/m ² K]	± 9.7

대한 예측은 관련 파라메타를 대상으로 Kline & McClintock¹¹⁾가 제안한 식으로 계산하여 최대값과 최소값의 범위를 Table 3에 나타내었다.

3. 데이터 정리

본 연구에서는 프로판 냉매의 물성값 계산에 NIST에서 개발한 냉매 물성계산 프로그램 'REFPROP (Version 6.02)'를 사용하였다. 시스템에 가해지는 열량은 파워서플라이에 의해 가해진 값으로 측정되며, 아래 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{re} = V \cdot I \quad (1)$$

여기서 Q_{re}는 시험부에 가해지는 열량이며, V와 I는 각각 전압과 전류값을 나타낸다. 그리고 시험부에 가해지는 열유속 q_{re}(kW/m²)는 다음 식에 의해 계산되었다.

$$q_{re} = \frac{Q_{re}}{\pi \cdot D_i \cdot \Delta z} \quad (2)$$

열전달 계수는 다음의 식 (3)과 같이 나타내어진다.

$$h_{exp} = \frac{q_{re}}{T_{wi} - T_{sat}} \quad (3)$$

여기서 q_{re}는 시험부에 가해지는 열유속이며, T_{wi}는 측정된 내벽면 온도 T_{wo}에서 열발생이 있는 원통에서의 일차원 열전도 방정식을 사용하여 구해진 관 외벽면 온도이며, 다음 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$T_{wi} = T_{wo} - Q_{re} \frac{\ln(D_o/D_i)}{(2 \cdot \pi \cdot dz \cdot k_w)} \quad (4)$$

여기서 k_w는 관벽의 열전도도이고, 열전대가 부착된 각 지점에서 평균 벽면온도는 관외벽면 상, 하, 좌, 우에서 측정된 평균온도이고, 냉매의 포화온도 T_{sat}는 측정된 압력과 차압으로부터 REFPROP를 사용하여 해당 압력의 포화온도를 구하였다. 이때 각 지점에서의 포화온도는 관길이 방향으로 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 건도 x는 냉매의 증발 잠열에 대한 각 온도 측정점에서의 엔탈피비로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$x = \frac{i - i_l}{i_{lg}} \quad (5)$$

각 지점에서의 엔탈피 i는 다음 식(6)에 의해 계산된다.

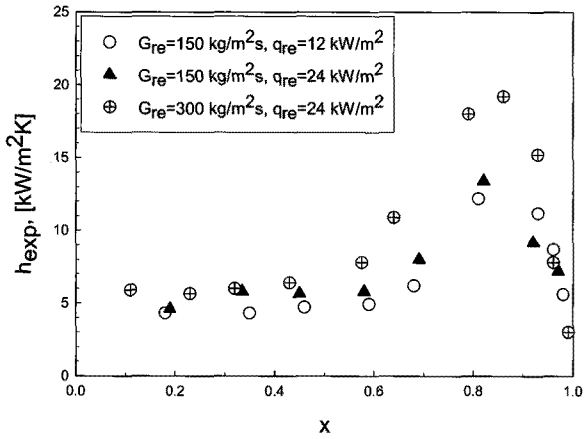
$$i = i_{in} + \frac{q_{re}}{G_{re}} \quad (6)$$

여기서 i_{in}은 과냉상태의 입구 엔탈피, G_{re}는 질량 유속, q_{re}는 입구에서 온도 측정지점 까지 구간에서 가해지는 열유속이다.

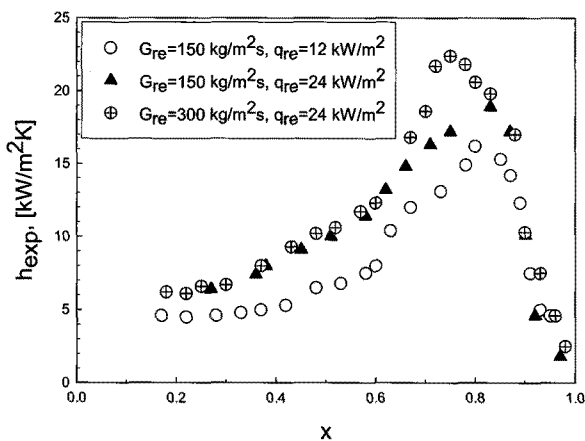
4. 결과 및 고찰

4.1 건도의 영향

Fig. 2는 내경 1 mm와 4 mm의 세관내 R-290의 국소열전달 계수를 건도, 질량유속, 열유속의 변화에 대해서 나타낸 것으로, Fig. 2의 (a)는 관경 4 mm, (b)는 1 mm에 대한 국소 증발열전달 계수를 나타낸 것이다. 우선 Fig. 2로부터 건도의 영향을 살펴보면, 건도가 증가할수록 R-290의 국소열전달 계수는 증가하다가 건도 0.7~0.8 정도에서 최대값을 가진 후, 다시 감소하는 경향을 보인다. 저건도에서는 성층류나 파형류와 같은 유동양식이 나타나 는 영역으로 핵비등이 지배적인 반면에 고건도에서는 환상류나 액적류와 같은 유동양식이 나타나고 강제대류비등이 지배적이다. 따라서 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서는 국소열전달 계수가 낮은 반면 강제대류비등 영역에서는 높다. 특히 건도 0.7~0.8



(a) $D_i=4$ mm



(b) $D_i=1$ mm

Fig. 2 Comparison between local evaporation heat transfer coefficients h_{exp} with mass flux and heat mass for R-290

영역에서 국소열전달 계수가 가장 높게 나타나는 데 이는 환상류 영역의 영향 때문이다. 그 후 국소열전달 계수가 급격히 감소하게 되는데 이는 관벽 주위의 액막이 사라짐으로 인해 관벽의 온도가 급격히 상승하는 드라이 아웃(dryout)현상 때문이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 본 실험의 모든 조건에서 드라이 아웃현상이 발생하는데, 특히 전열관의 관경이 작을수록 드라이 아웃이 발생하는 건도가 낮아지는 것을 알 수 있고 이러한 경향은 고질량유속 조건에서 상당히 뚜렷하게 나타난다.

4.2 열유속의 영향

Fig. 2에서 열유속의 영향을 살펴보면, 즉, 질량유속을 $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 일정하게 한 상태에서 열유속을 12 kW/m^2 에서 24 kW/m^2 로 증가시켰을 경우 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서 열유속이 증가할수록 국소 열전달 계수는 증가하는 경향을 보인 반면

고건도 영역에서는 열유속의 영향이 나타나지 않는다. 이는 저건도 영역에서 열유속의 영향에 의한 핵비등이 열전달 계수에 지배적인 영향을 미치지만 고건도 영역에서는 핵비등이 억제되고 질량유속과 건도의 증가에 의한 강제대류비등이 열전달 계수의 증가에 지배적인 영향을 미치기 때문이다. Choi 등¹²⁾은 수평미세관내 R-290의 비등열전달 특성에 대한 실험적 연구를 통해 동일한 연구결과를 발표하였다.

4.3 질량유속의 영향

Fig. 2로부터 질량유속을 살펴보면, 즉 동일한 열유속 24 kW/m^2 에서 질량유속을 $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가시켰을 때, 저건도 영역보다 고건도 영역에서 R-290의 증발열전달 계수는 증가하는 경향을 보였다. 이는 질량유속이 증가할수록 관내 냉매 레이놀즈수(Re)의 증가와 증기속도의 증가로 인해 환상유동이 더욱더 발달하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 타 연구자들^{6~8, 11)}의 연구결과와 일치한다. 증발열전달 계수에 대한 질량유속의 영향이 저건도보다 고건도에 뚜렷하게 나타나는 것은 우선, 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서는 열유속에 영향을 받고, 강제대류가 지배적인 고건도 영역에서는 질량유속에 영향을 받기 때문이다. 따라서 질량유속의 영향이 저건도 영역에 확실하게 나타나지 않는 것은 질량유속이 핵비등에 영향을 미치지 않기 때문이다.

4.4 관경의 영향

Fig. 2의 (a)와 (b)에서 관경이 작아질수록 동일한 실험조건에서 국소 증발열전달 계수가 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 강제대류비등에서 볼 수 있는 환상류 유동이 전체 건도 영역에서 지배적으로 나타나기 때문이다. 즉, 관경이 작아질수록 관주위로 액막이 형성되는 환상류 유동이 더욱더 많은 건도 범위에서 발생하기 때문이다. Wen 등⁵⁾은 내경 2.46 mm의 동관내 R-290의 비등열전달에 대해 실험하였다. 각각의 실험조건은 증발온도 6°C , 질량유속 $350 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 21 kW/m^2 으로, 건도 0.1에서 국소 증발열전달 계수는 $11 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 이고, 건도 0.8에서는 $15 \text{ kW/m}^2\text{K}$ 로 증가하는 결과를 보고하였다.

4.5 관주방향의 국소열전달 계수

Fig. 3은 내경 4 mm 관내 R-290의 관주방향 국소 증발열전달 계수를 건도변화에 따라 나타낸 것

이다. 즉, 실험장치 및 방법에서 설명한 것처럼 관 외벽의 상부, 측부, 하부에서 측정된 온도를 기준으로 계산한 국소 열전달계수를 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 건도 0.7 이하에서는 국소 열전달 계수가 관주방향으로 차이가 거의 없지만, 건도 0.7에서는 관상부벽의 국소 열전달 계수가 최대값 10 kW/m²K, 관측부벽의 열전달 계수는 건도 0.8에서 최대값 12 kW/m²K를 관하부벽의 열전달 계수는 건도 0.9에서 최대값 11 kW/m²K를 나타내며, 그 이후로는 모두 감소한다. 이와 같은 현상이 나타나는 이유는 관내벽면 주위로 형성되어 있는 액막이 관상부벽, 관측부벽, 관하부벽 순으로 사라지고 이로 인해 관벽면 온도가 앞의 순서대로 급격히 상승하여 국소 열전달 계수는 모두 감소하게 된다.

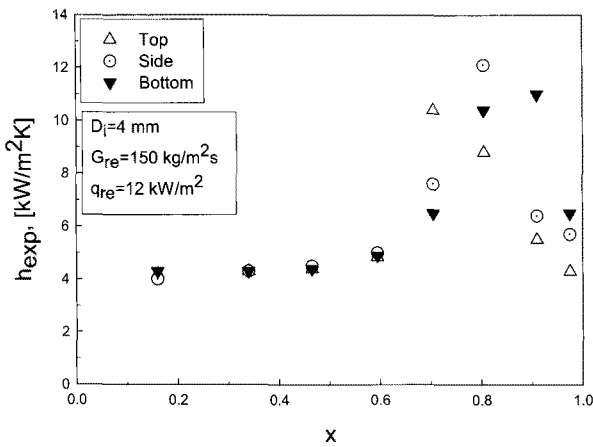
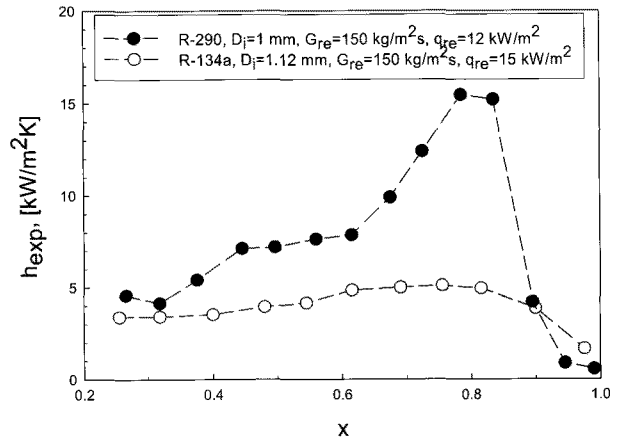


Fig. 3 Variation of circumferential evaporation heat transfer coefficients h_{exp} to quality x for inner diameter tube of 4 mm

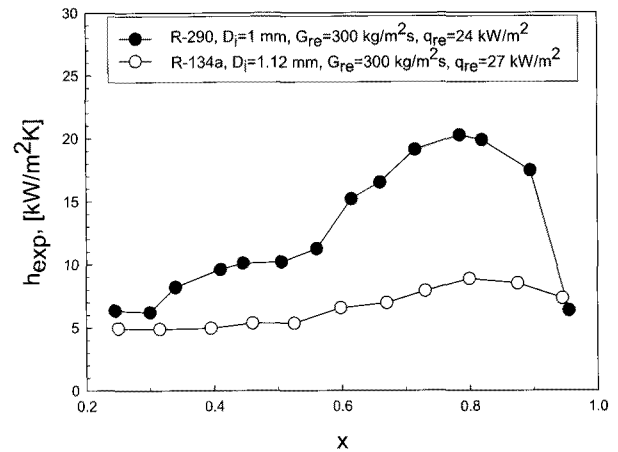
4.6 타 냉매와 비교

Fig. 4는 탄화수소계 냉매인 R-290과 프레온계 냉매인 R-134a의 국소 증발열전달 계수를 비교한 것이다. Fig. 4(a)의 실험조건은 질량유속이 150 kg/m²s로 동일하고 관경과 열유속은 각각 1 mm와 1.12 mm, 12 kW/m²과 15 kW/m²로 거의 유사하다. Fig. 4(b)의 조건은 질량유속이 300 kg/m²s로 동일하고 관경과 열유속은 각각 1 mm와 1.12 mm, 24 kW/m²과 27 kW/m²로 거의 유사하다.

Fig. 4 (a)에서 알 수 있듯이, R-290과 R-134a의 국소 증발열전달 계수는 건도 0.8에서 동일하게 최대값을 가지며, R-290은 16~17 kW/m²K이고, R-134a는 5 kW/m²K이다. 즉 건도 0.8의 최대값에서 서로 비교하면 R-290이 R-134a보다 3배 정도 높게 나타났다. 그리고 Fig. 4 (b)에서도 마찬가지로



(a) $G_{re} = 150 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q_{re} = 12 \sim 15 \text{ kW/m}^2$



(b) $G_{re} = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q_{re} = 24 \sim 27 \text{ kW/m}^2$

Fig. 4 Comparison of local evaporation heat transfer coefficients h_{exp} of R-290 with R-134a

동일한 경향을 보였고, 특히, 건도 0.8에서 최대값은 R-290이 20~23 kW/m²K이고, R-134a는 9 kW/m²K이다. 즉 2.5배 정도 R-290이 높은 것을 알 수 있다. 이에 대한 이유로서, 우선 R-290의 기상 비체적(15 °C의 포화상태 : 0.063 m³/kg)이 R-134a(0.042 m³/kg)보다 높고, 또한 R-290의 기상과 액상의 열전도도(액상 : 98.43 mW/mK, 기상 : 17.57 mW/mK)가 R-134a(액상 : 88.54 mW/mK, 기상 : 12.86 mW/mK)보다 크기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 내경 1 mm와 4 mm의 스테인레스 관(SUS316)내 R-290의 증발열전달 특성을 다양한 조건에서 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 환경에 상관없이 건도가 증가할수록 국소열전달 계수는 증가하다가 드라이아웃 이후에는 급격히 감소한다. 환경이 작아질수록 건도의 증가에 대한 국소열전달 계수의 증가율이 크다. 저건도영역에서는 핵비등의 영향이 크고, 고건도영역에서 강제대류 비 등의 영향이 크다.
- 2) 본 실험의 모든 조건에서 전열관의 환경이 작을수록 드라이 아웃이 발생하는 건도가 낮아지는 것을 알 수 있고 이러한 경향은 고질량유속과 고열유속 조건에서 매우 뚜렷하게 나타났다.
- 3) 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서 열유속이 증가 할수록 국소열전달 계수는 증가하는 경향이냐 고건도 영역에서는 열유속의 영향이 나타나지 않았다.
- 4) 질량유속은 저건도 영역보다 고건도 영역에서 R-290의 증발열전달 계수는 증가하는 경향을 보였다.
- 5) 관주방향의 R-290 비등열전달 계수는 저건도 영역에서 거의 유사한 값을 보이지만 고건도영역으로 갈수록 관상부, 관측부, 관하부의 순으로 열전달 계수가 최대값을 가지고 감소하였다.
- 6) R-290과 R-134a의 증발열전달 계수를 비교한 결과, 전체 건도영역에서는 R-290이 R-134a보다 1~3배 정도 크게 나타났고, 건도 0.8인 지점에서는 R-290의 증발열전달 계수가 R-134a 보다 2.5~3배 정도 크게 나타났다.

참고 문헌

1. T. Ebner and H. Halozan, 1994, Testing the Available Alternative - An Examination of R-134a, R-152a and R-290, IEA HPC Newsletter, Vol. 12, No. 1, Sittard, The Netherlands.
2. H. Kruse, 1993, European Research and Development Concerning CFC and HFC Substitution, ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, pp. 41~54.
3. M. S. Kim, W. J. Mulroy and D. A. Didion, 1993, An Experimental Evaluation of the Flammability and Performance Potentials of Two Azeotropic Refrigerant Mixtures, Transport Phenomena in Thermal Engineering, pp. 446~451.
4. R. W. James and J. F. Missenden, 1992, The Use of Propane in Domestic Refrigerators, International Journal of Refrigeration, Vol. 15, No. 2, pp. 95~100.
5. M. Y. Wen and C. Y. Ho, 2005, Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290(propane), R-600 (butane), and a mixture of R-290/R-600 in the three-lines serpentine small-tube bank, Applied Thermal Engineering, 25, pp. 2921~2936.
6. D. S. Jung et al., 2005, Nucleat boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants on various enhanced tubes, Int. J. Refrigeration, Vol. 28, pp. 451~455.
7. J. M. Cho et al., 2005, Experimental studies on the evaporative heat transfer of R32/R290 mixtures in a horizontal smooth tube, Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Proceedings of the SAREK 2005 Winter Annual Conference Volume, 05-W-042, pp. 268~273.
8. H. S. Lee et al., 2005, Evaporating heat transfer and pressure drop of hydrocarbon refrigerants in 9.52 and 12.70 mm smmoth tube, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 2351~2359.
9. M. W. Spatz and S. F. Y. Motta, 2004, An evaluation of options for replacing HCFC-22 in medium temperature refrigeration systems, Int. J. of Refrigeration, Vol. 27, pp. 475~483.
10. Y. Chen et al., 2005, Pool boiling heat transfer of propane, isobutane and their mixtures on enhanced tubes with reentrant channels, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 2310~2311.
11. S. J. Kline and F. A. McClintock, 1953, Describing Uncertainties in Single Sample Experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, No. 1, pp. 3~12.
12. K. I. Choi, A. S. Pamitran and J. T. Oh, 2006, Boiling heat transfer characteristics of R-290 in horizontal smooth minichannel, SAREK, Vol. 18, No. 11, pp. 906~914.