

평활관 내 R32/290 혼합냉매의 증발열전달 특성에 관한 실험적 연구

조진민¹, 김주혁², 윤석호¹, 김민수[†]

서울대학교 기계항공공학부¹, LG전자(주) DA연구소², *서울대학교 기계항공공학부

Experimental studies on the evaporative heat transfer of R32/290 mixtures in a horizontal smooth tube

Jin Min Cho¹, Ju Hyok Kim², Seok Ho Yoon¹, Min Soo Kim[†]

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

²DA laboratory, LG electronics, Inc. Seoul 152-848, Korea

ABSTRACT: Because of environmental issues caused by CFC, HCFC or HFC refrigerants, new alternative refrigerants has gained a significant attention. This paper presents experimental information on heat transfer coefficient and pressure drop behavior during evaporation process of R32/290 mixtures in a horizontal smooth tube. A smooth tube with outer diameter of 5 mm and length of 5 m was selected as a test tube. Heat transfer coefficients and pressure drop characteristics were measured for a range of mass fluxes from 497 to 994 kg/m²s, heat fluxes from 12 to 20 kW/m² and for several mixture compositions(100/0, 75/25, 58.4/41.6, 25/75, 100/0 by wt% of R32/290). The differences of measured heat transfer characteristics among various R32/290 refrigerant mixtures were analyzed for various compositions.

Key words: heat transfer coefficient(열전달계수), evaporation(증발), refrigerant mixture (혼합냉매), smooth tube(평활관), pressure drop(압력강하)

기호 설명

- G : 질량유속 [kg/m²s]
- h : 열전달계수 [W/m²K]
- T_{sat} : 포화온도 [°C]

하첨자

- sat : 포화상태

1. 서론

기존의 뛰어난 화학적, 열역학적 성질에 힘입어

냉동 공조 산업계에서 널리 사용되어 왔던 CFC 계열의 냉매는 최근 지구 온난화, 오존층 파괴와 같은 심각한 환경문제를 야기시켜 그 대체냉매의 필요성을 고취했다. 따라서 그 대체 냉매로서 R-22와 같은 HCFC 계열의 냉매 및 HFC 계열의 냉매들이 사용되어 오다가 이들 역시 지구온난화에 영향을 준다는 것이 확인되면서 여러 가지 규제를 받기 시작하였다. 이에 따라 최근 각광을 받고 있는 냉매가 바로 자연냉매, 특히 탄화수소계 냉매들이다. 이러한 냉매들은 새롭게 설계되는 에어컨이나 냉동시스템에서 환경친화적인 대체냉매로서 관심을 받고 있다. 최근 유럽에서는 HC계열 냉매를 이용한 고효율 장치 개발에 주력하고 있

† Corresponding author

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

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

고 특히 열펌프 장비의 많은 부분이 HC 계열 냉매로 신속하게 전환되고 있는 실정이다. 또한 독일의 경우 가연성 냉매(특히 HC 계열 냉매)의 사용 확대를 위한 규정 제정을 하고 있다. 그래서 대체냉매로서 HC계열 냉매와 그 혼합물에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Choi et al.⁽¹⁾은 R22의 대체냉매로서 9.55 mm 평활관내 R32, R134a, R32/134a, 그리고 R407C에 대한 증발열전달에 관해 연구하여 그 냉매들과의 비교를 통해 R22의 대체냉매로서의 가능성을 고찰하였고 Shin et al.⁽²⁾도 R22의 대체냉매로서 R32, R134a 등의 순수 냉매와 R32/134a, R290/600a등의 혼합냉매에 대한 연구로 열전달의 경향을 조사하고 대체냉매로서의 가능성을 확인하였다. 또한 Wen et al.⁽³⁾은 R290, R600 그리고 R290/600 혼합냉매들의 가연성 냉매에 대해 열전달과 압력강하에 관한 실험적 고찰을 한 결과 비교 냉매 R134a 보다 좋은 열전달 특성과 압력강하의 경향을 살피고 새로운 상관식을 제시하였고 Jung et al.⁽⁴⁾은 여러 가지 탄화수소계열 냉매(가연성 냉매)인 R290, R600a, R600에 대해 다양한 축진관에서의 핵비등 열전달에 관해 연구하여 그 특성을 살펴보았다. 그러나 최근에 천연냉매로서 HC계열(특히 R290)의 냉매가 각광을 받고 있으나 그 혼합물에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 지구온난화지수가 비교적 낮은 HFC 계열 R32와 기존 냉동시스템에 사용되는 냉동유나 금속 재료와의 호환성이 우수하고 동일 냉동부하에 대해 적은 양의 냉매 사용이 가능하며 환경친화적인 대표적 자연냉매, 특히 탄화수소계 냉매인 R290의 혼합냉매를 고려하였다. 이 냉매에 대하여 증발기의 최소 외경인 5 mm 평활관에서의 증발 열전달 특성에 관해 고찰해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 냉 매

본 연구에서 사용한 냉매는 전술한 바와 같이 R32/290 혼합냉매이다. 혼합냉매의 성분비는 구성요소인 순수냉매의 질량비 기준 100/0, 75/25,

Table 1 Thermophysical properties of R22, R32, and R290⁽⁵⁾

Refrigerant	R22	R32	R290
Molar mass, kg/kmol	86.47	52.02	44.10
Liquid density(at 20°C), kg/m ³	1210	981.4	500.3
Ozone Depletion Potential	0.05	0	0
Global Warming Potential	1700	650	3

58.4/41.6(공비), 25/75, 0/100인 냉매를 사용하였다. Table 1에 본 연구에서 사용된 냉매들의 물성치를 소개하였다.

2.2 실험장치

Fig. 1에 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 냉매 펌프, 질량 유량계 (mass flow meter), 예열기(preheater), 열전달 시험부(test section), 열교환기(heat exchanger)등의 냉매 루프와 냉동기(chiller)등의 2차 유체 루프로 구성되어 있다. 냉매 펌프는 과냉상태의 냉매를 순환시키고, 질량 유량계는 액상에서의 유량을 측정하기 위해 예열기 전에 장착하였다. 유량계를 통과한 냉매는 예열기를 거쳐 시험부로 들어가며, 시험부에서 직접 가열에 의한 열을 공급받아 증발 과정을 거친 후, 수액기로 들어가게 된다. 예열기는 시험부와 동일한 외경(5 mm)으로 제작하여 절연테이

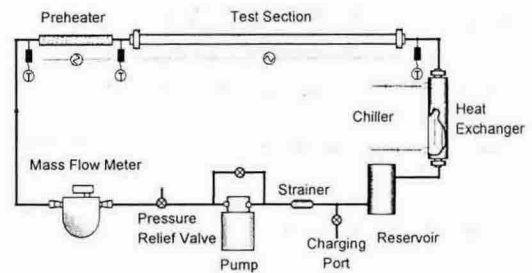


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

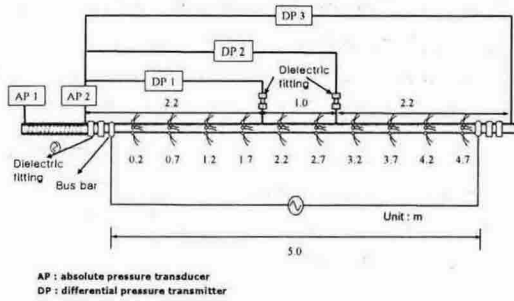


Fig. 2 Schematic diagram of the test section

프로 절연한 후 니크롬선을 감아 유리섬유로 단열을 하여 간접 가열방식으로 냉매에 열량을 공급하도록 제작하였다. 또한 가변 전원공급기를 이용하여 예열기에 전원을 공급함으로써 시험부 입구에서의 원하는 냉매의 건도 조절을 할 수 있도록 하였다.

2.3 시험부

Fig. 2에 본 연구의 시험부에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 시험부는 냉매가 흐르는 시험관, 압력을 측정하기 위한 압력탭, 관의 외벽면 온도를 측정하기 위한 T형 열전대 등으로 구성되어 있다. 시험부로 5 mm 의 외경으로 5 m의 긴 관을 설치하였는데 이는 열전달 특성에 대한 열적 입구 길이 효과(thermal entry length effect)를 무시할 수 있도록 하고 저유량 조건에서도 높은 출구 건도를 확보하기 위해서이다. 관의 외벽면 온도를 측정하기 위해서 T형 열전대(copper-constantan)를 50 cm 간격으로 10곳에 부착하였고 각 위치에서 상, 하, 좌, 우 4곳에서 외벽면의 온도를 측정

Table 2 Test conditions in this study

Parameter	Value
Mass flow rate (kg/m ² s)	497, 746, 997
Heat flux (kW/m ²)	12, 16, 20
Outlet temperature (°C)	-5

그리고 1.0 m 간격으로 압력을 측정하기 위해 압력탭을 설치하였다. 또한 시험부의 외부로의 열손실 및 열유입을 최소화하기 위해서 유리섬유로 단열시켰다. 증발열전달 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 냉매의 질량유속, 외부에서 가해지는 열유속이다. 냉매의 질량유속을 세 경우로, 열유속을 세 가지로 변화시키고 실험을 수행하였다. Table 2에 실험조건을 정리하여 나타내었고 각 냉매의 포화압력, 증발잠열 등의 열역학적 물성치가 다르므로 각 냉매의 열전달계수를 비교하기 위해서 같은 실험 조건을 맞출 필요가 있기 때문에 시험부 출구 온도를 일정하게 유지하였다.

2.4 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⁽⁵⁾을 이용하여 측정된 압력을 이용하여 계산한 증발온도이다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전달

다양한 조건에서 나타난 혼합냉매의 증발 열전달 특성은 기존의 순수냉매 R22, R134a 등과 같이 저건도 지역 증발 초기에 핵비등의 영향으로 열전달이 활발하게 이루어져 열전달 계수가 크게 나타나다가 이후로 핵비등의 영향이 감소하면서 열전달계수가 약간 감소하는 경향을 보였다. 고건도 지역으로 갈수록 증발이 진행되면서 대류비등의 영향이 강해서 열전달 능력이 다시 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4에 일정 질량유속과 열유속, 그리고 출구온도에서 혼합냉매의 성분 비에 따른 증발열전달계수의 변화를 나

타내었다. 저건도 지역에서 순수 냉매의 경우 혼합냉매에 비해 핵비등이 약하게 일어나 증발이 진행됨에 따라 나타나는 감소 경향이 거의 나타나지 않았고 증발이 계속적으로 일어나 고건도 지역으로 갈수록 열전달 계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면 혼합냉매의 경우 핵비등 영향을 받아 높은 열전달 계수를 보이다 주춤하면서 다시 대류비등의 영향이 강해짐에 따라 증가하는 양상을 볼 수 있다. 또한 Mathur et al.⁽⁶⁾이 예측한 바와 같이 열역학적 물성치의 차이에 의해 고온증발 냉매, 즉 상대적으로 저압 냉매인 R290의 열전달 계수와 고압 냉매인 R32의 열전달 계수 사이에 나타나고 있는데 성분비별로 R32가 더 많은 비율을 차지하는 혼합냉매의 열전달 계수가 조금 더 크게 나타났으며 전반적인 열전달 메커니즘은 혼합냉매의 경우 비슷한 경향을 보였다. 또한 Fig. 4에 Fig. 3에서의 질량유속, 열유속 조건보다 더 큰 조건에서의 열전달 특성을 나타내었는데 열유속이 커질수록 더 발달되는 핵비등의 영향으로 전반적인 열전달 메커니즘은 비슷한 경향을 보였다. 또한 질량유속이 커지게 되면 레이놀즈수가 커지게 되고 결과적으로 열전달의 향상이 나타나게 된다. 그리고 질량유속이 커지게 되면 계면에서 일어나는 대류비등이 활발해지기 때

문에 증발 초기의 핵비등의 영향도 질량유속이 작은 경우에 상대적으로 약해지는 것을 알 수 있다.

3.2 압력강하

Fig. 5과 6에 R32/290 혼합냉매의 성분비 변화와 질량유속과 건도에 따른 압력강하의 변화를 나타내었다. 질량유속이 증가할수록 압력강하가 증가하는 순수냉매와 등온비등 혼합냉매 모두 비슷한 경향을 보이고 있는데 고압냉매인 R32, 즉 성분비가 100/0의 경우 $G^{1.42}$ 정도로, 저압냉매인 R290, 즉 0/100의 경우 $G^{1.36}$, 그리고 나머지 성분비 75/25, 58.4/41.6 그리고 25/75 혼합냉매의 경우 평균 $G^{1.38}$ 정도로 각각 증가하는 경향을 보이고 있는데 압력강하의 경우에도 혼합냉매의 경우 구성요소인 순수(100/0, 0/100)냉매의 압력강하 값들 사이에 값들이 존재함을 알 수 있었다. 이는 고건도로 갈수록 기상밀도가 높아져 압력강하가 커지는 것을 알 수 있는데 R32/290 혼합냉매의 경우 그 강하 폭이 가장 크고 그 다음에 R32/290 혼합냉매의 압력강하 특성을 보이며 R290의 경우 가장 낮게 나타났다. 한편 Wen et al.⁽³⁾은 R600을 이용한 연구에서 $G^{1.41} \sim G^{1.60}$ 정도로 증가한다고 하였고,

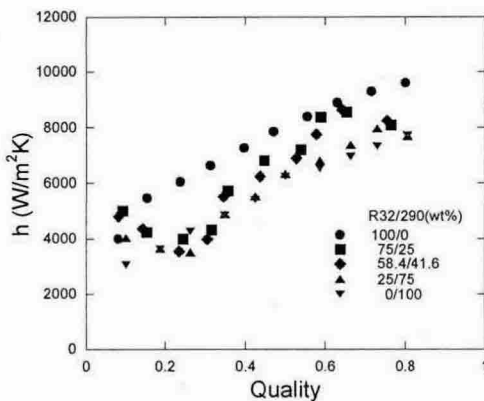


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficients for different heat flux at a mass flux of $746 \text{ kg/m}^2\text{s}$, a heat flux of 12 kW/m^2 and outlet temperature of -5°C

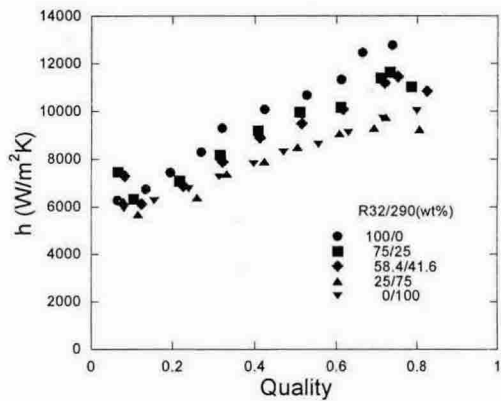


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficients for different heat flux at a mass flux of $997 \text{ kg/m}^2\text{s}$, a heat flux of 16 kW/m^2 and outlet temperature of -5°C

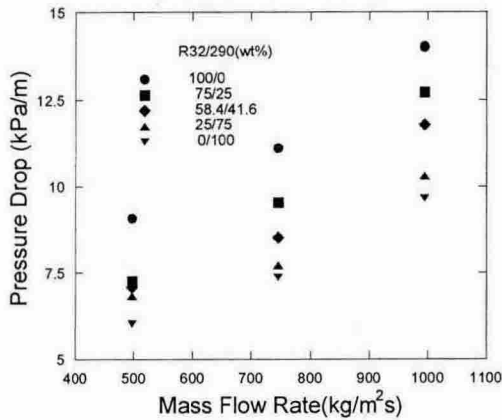


Fig 5. Pressure drop as a variation of mass flux

Kuo와 Wang⁽⁷⁾은 R22를 이용한 실험에서 $G^{1.65}$ 정도로 증가한다고 보고하였고, Kim et al.⁽⁸⁾은 R410A를 이용한 연구에서 $G^{2.33}$ 정도의 관계를 보인다고 보고하였다. 따라서 기존 다른 냉매들에 비해 R32/290 혼합냉매의 경우 압력강하가 상대적으로 작은 값을 보임을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 R32/290 혼합냉매의 여러 가지 성분비에 대한 5 mm 평활관 내에서의 증발 열전달 특성을 다양한 질량유속, 열유속 및 출구온도 조건에서 살펴보고 압력강하에 대하여 고찰해 보았다. 순수냉매와 혼합냉매에 대한 열전달 특성을 비교하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 혼합냉매의 열전달 특성은 성분비 100/0(R32/290), 0/100에서는 다양한 조건에서 순수 냉매와 비슷한 경향을 보였고, 75/25, 58.4/41.6, 25/75의 경우 저건도 지역 증발 초기에 핵비등의 영향으로 열전달이 활발하게 이루어져 열전달 계수가 크게 나타나다가 이후로 핵비등의 영향이 감소하면서 열전달계수가 약간 감소하는 경향을 보이다가 고건도 지역으로 갈수록 증발이 진행되면서 대류비등의 영향이 강해서 열

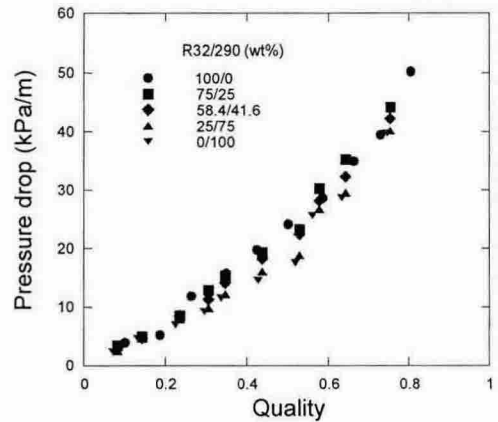


Fig. 6 Pressure drop as a variation of quality at a heat flux of 12 kW/m^2 and mass flux of $497 \text{ kg/m}^2\text{s}$

전달 능력이 다시 커지는 경향을 보이는데 R32의 비율이 높을수록 약간 큰 열전달 특성을 보였다.

(2) 압력강하에 대해 살펴본 결과 고압냉매인 R32 순수냉매, 즉 성분비가 100/0의 경우 $G^{1.42}$ 정도로, 저압냉매인 R290 순수냉매, 즉 0/100의 경우 $G^{1.36}$, 그리고 혼합냉매의 경우 평균 $G^{1.38}$ 정도로 증가하는 경향을 보였으며 기존의 R22, R410A 등의 냉매보다는 작은 것으로 나타났다.

(3) 지구온난화 지수가 비교적 낮은 HFC 계열의 냉매 R32와 환경친화적인 대표적 자연냉매인 R290의 혼합냉매는 비교적 좋은 증발 열전달 특성을 보이고 있다. 특히 58.4/41.6 wt%의 혼합비를 갖는 혼합냉매에서 열전달 특성이 좋으며 향후 R32/290 등온비등혼합냉매는 이를 이용한 제품의 설계 및 최적화된 열교환기의 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Choi, T. Y., Kim, M. S. and Ro, S. T. Evaporation heat transfer of R-32, R-134a, R-32/134a, and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube, 1999, Int. J. Heat

- and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3651-3660.
2. Shin, J. Y., Convective boiling heat transfer of the pure refrigerant and the refrigerant mixtures, 1996, Ph. D. Thesis, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea.
 3. Wen, M. Y , Ho, C. Y., Evaporation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290(propane), R-600(butane), and mixture of R-290/R-600 in the three-lines serpentine small-tube bank, 2005, Applied Thermal Engineering, Article in press.
 4. Jung, D. S., Lee, H. S., Bae, D. S., and Ha, J. C., Nucleat boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants on various enhanced tubes, 2005, Int. J. refrigeration, Vol. 28, pp. 451-455.
 5. 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, Gaithersburg, Maryland, USA
 6. Mathur, G. D., Heat transfer coefficient for propane(R-290), isobutane(R-600), and 50/50 mixture of propane and isobutane, ASHRAE Transaction: Symposia, 1998, pp. 1159-1172
 7. 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 Mass Transfer, Vol. 39, pp. 2559-2569.
 8. 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. 716-730.