

프로판을 냉매로 한 관내 응축 증발 열전달 특성

민경현 · 차동안 · 이호생 · 김재돌* · 한인근** · 윤정인***
부경대학교 대학원, 동명대학*, (주)에이알**, 부경대학교***

Condensation and Evaporation Heat Transfer Characteristics of R-290 in Smooth Tube

K. H. Min · D. A. Cha · H. S. Lee · J. D. Kim* · I. G. Han** · J. I. Yoon***
Pukyong N.U. Graduate School, Tongmyong College*, AR Co.,Ltd**,Pukyong N.U.***

1. 서 론

급격히 증가하는 냉동공조산업에 대한 요구와 함께 냉매에 의한 환경문제는 인류 공동의 선결 과제로 손꼽히고 있다.^{1),2)} CFC계 냉매의 전폐된 이후, HCFC계 냉매의 단계적 규제와 진행중이며 이에 따라 대체냉매로서 HFC계 냉매나 비공비 혼합냉매가 권장되고 있으나 HFC계 냉매 또한 문제점이 보고되고 있다.³⁾ 또한 혼합냉매는 본질적으로 다루기 힘들고 보수 시에는 성분비의 변동이 생겨 초기 성분비 재현이 어려운 문제점을 안고 있다. 이에 새로운 대체냉매는 오존파괴지수뿐만 아니라 지구온난화계수, 안전성, 신뢰성, 경제성, 기존설비 등을 고려해야만 한다. 이러한 이유로 암모니아(NH₃), 탄화수소계(HC's), 이산화탄소(CO₂), 질소(N₂), 헬륨(He), 물(H₂O), 공기 등의 자연 냉매에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 (H)CFC 냉매를 대체하기 위하여 프로판, 부탄 등의 탄화수소계 냉매가 적극 검토되고 있다.

탄화수소계 냉매는 비점이 R-22나 R-407C와 거의 동일하여 대체냉매로 사용가능하고 성능계수도 R-22와 유사하여 열사이클적 장점도 가지고 있으나 가연성의 문제로 사용이 거의 무시되어 왔다. 그러나 지구 온난화 문제가 심각하게 거론됨으로써 (H)CFC 냉매를 대체하기 위하여 온난화 지수가 낮은 탄화수소계 냉매의 사용이 적극적으로 검토되고 있다. 가정용 냉장고의 경우 James의 보고서에 의해 탄화수소계 냉매의 충전량이 CFC계 냉매의 절반 정도이므로 가연성에 의한 폭발의 위험은 거의 없는 것으로 밝혀졌다.⁴⁾ 그러나 이러한 탄화수소계 냉매를 실제 냉동·공조 장치에 적용하기 위한 기초 자료가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 HCFC계 냉매인 R-22를 기본 작동유체로 한 열펌프를 제작하여 탄화수소계 냉매인 R-290(propane)으로 작동유체를 변화시켜 평활관에서의 응축 증발 전열특성을 비교·분석하여 탄화수소계 냉매를 대체냉매로 사용하는 열교환기의 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 실험장치

실험 장치는 크게 유니트부와 열교환기부로 구성된다. 유니트부는 압축기, 유분리기, 수액기, 드라이어, 팽창밸브, 액분리기, VS모터, 인버터, 컨트롤부로 구성되어 있으며 열교환기부는 응축기와 증발기로 구성되어 있다. 인버터를 사용하여 회전수를 변화시키는 압축기와 수동식 팽창밸브를 설치하여 냉매의 유량 및 열교환기 입구온도를 조절하였다. 열교환기는 내관으로 냉매가 흐르고, 내관과 외관 사이의 환상구간으로 열원수가 냉매와 대향류로 흐르

는 이중관식 열교환기이다. Fig. 1과 Fig. 2는 본 실험의 시험부인 응축기 및 증발기를 나타내는 사진과 그림이다. 각 열교환기는 내관이 12.7mm, 외관이 22.22mm인 수평 평활 동관으로 제작하여 입구측으로부터 관길이에 따라 등간격으로 구분된 소구간에서의 냉매, 열원수, 열교환기 내관 외벽면온도를 측정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 내관 외벽면온도를 측정하기 위하여 T형 열전대를 소구간의 중앙, 관의 상·하·측부 3점에 90° 간격으로 설치하였다. 측정된 데이터는 데이터 로그(Yokogawa 사)를 통하여 PC에서 처리하였다. 냉매 유량을 측정하기 위해 수액기와 증발기 사이에 질량유량계를 설치하였고 응축기 및 증발기에 공급하는 이차유체의 온도 조절을 위해 항온조와 히터를 설치하였으며 이차유체의 유량 측정을 위해 수유량계를 각각 설치하였다. 열교환기 및 장치내 배관은 충분히 단열하여 외부와의 열교환은 무시하였다. 주요 실험조건은 Table 1에 나타내었으며 냉매의 포화압력과 포화온도가 30분 이상 평형상태를 유지하는 정상상태에서의 데이터를 취득하였다.

3. 응축 전열 특성

응축기 열교환량의 정확성 여부를 검토하기 위하여 응축기에서의 냉매와 열원수 사이의 열평형을 검토하였다. Fig. 4은 열원수 유량의 변화에 따른 열평형을 나타낸 그림이다. 열원수 유량은 420, 540, 660 kg/h로 변화시켰으며, 가로축은 냉각수 유량과 입·출구 온도차로 계산한 열용량 Q_s 이고, 세로축은 응축기 입·출구에서의 냉매의 유량과 엔탈피차로 계산한

Table 1 Experimental conditions

| Refrigerant | |
|---|---------------------|
| Working fluid | R-22, R-290, R-600a |
| Condensing Temperature [K] | 313.15 |
| Mass velocity [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] | 50~200 |
| Chilled water | |
| Temp. of Eva. Inlet [K] | 288.15 |
| Mass flow rate [kg/h] | 350~400 |
| Cooling water | |
| Temp. of Cond. Inlet [K] | 313.15 |
| Mass flow rate [kg/h] | 400~450 |

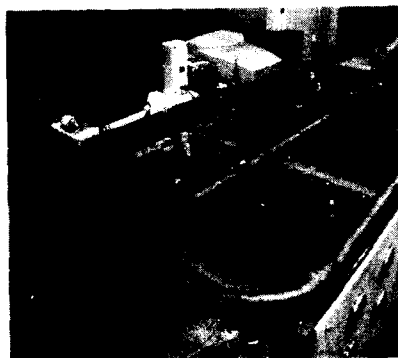


Fig. 1 Photograph of Heat Exchanger

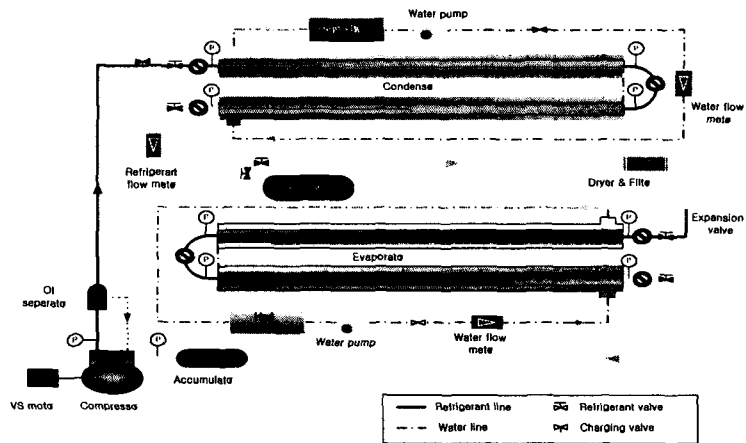


Fig. 2 Schematic flow diagram of experimental apparatus

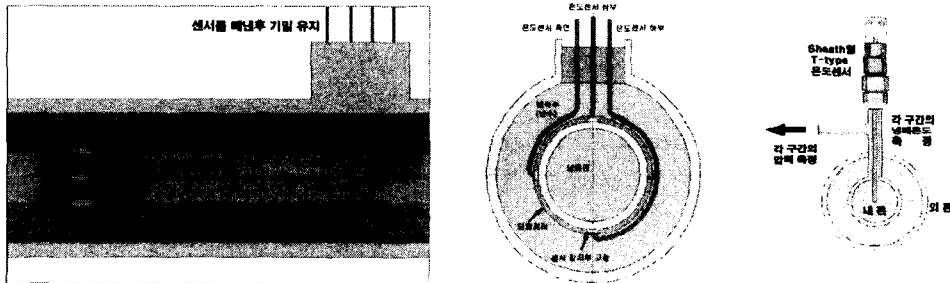


Fig. 3 Setting of temperature sensor

열용량 Q_r 이다. 그림에서의 오차범위는 냉매의 종류와 냉각수 유량변화에 관계없이 $\pm 10\%$ 내외에서 거의 일치하였다. 따라서 응축기의 방열상태는 양호하며, 응축기에서의 열평형은 비교적 우수한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 5는 응축기에서 측정한 R-22, R-290의 구간별 냉매온도의 분포를 나타낸 것이다. 냉매의 흐름은 그림의 좌측방향에서 우측방향으로 진행된다. 그림에서 두 냉매 모두 구간 3 정도부터 응축을 시작하여 구간 8 부근에서 응축이 종료되고 과냉이 시작되는 경향을 보이고 있다. 이를 통하여 냉매의 응축이 완료되는 구간을 유추할 수 있었다. R-290의 경우 R-22보다 대체적으로 높은 온도를 유지하였다. 이는 R-290의 응축압력대가 R-22보다 조금 높은 것이 원인이라 사료된다.

Fig. 6는 각 냉매별 국소 응축 열전달 계수를 나타낸 것이다. 냉매의 흐름은 그림에서와 같이 모든 냉매의 열전달 계수는 건도가 감소함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보였다.

Fig. 7은 질량유속에 대한 평균 응축 열전달 계수를 나타낸 것이다. 평균 응축 열전달 계수는 건도 x 에 따른 국소응축열전달 계수를 통합함으로써 구할 수 있다. 질량유속에 비례하여 평균응축열전달 계수가 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 탄화수소계 냉매인 R-290의 평균응축열전달 계수가 프레온계 냉매인 R-22보다 우수하게 나타났으며, 질량유속에 따른 평균 증발 열전달 계수의 향상도 탄화수소계 냉매의 경우에서 보다 우수함을 보였다.

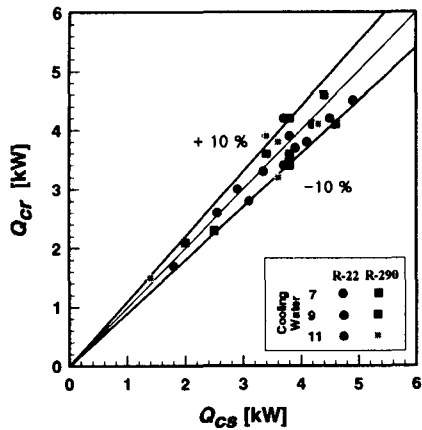


Fig. 4 Heat balance between Q_s and Q_r in the condenser

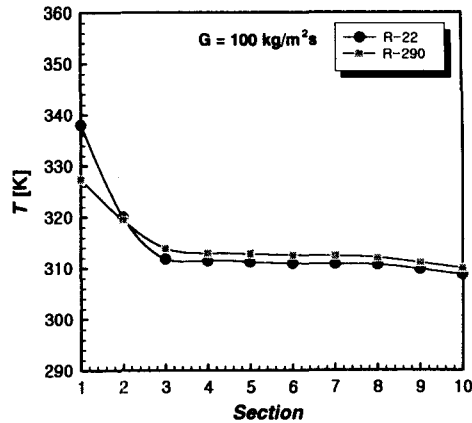


Fig. 5 Refrigerant temperature profiles in the condenser

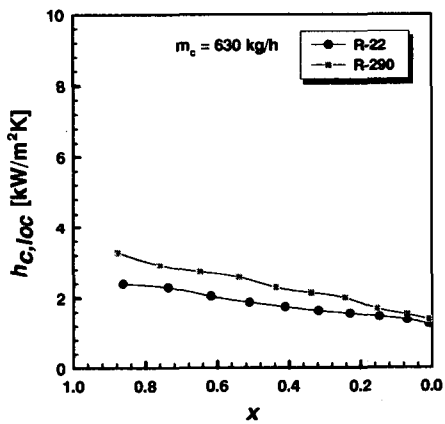


Fig. 6 Local condensation heat transfer coefficient to quality

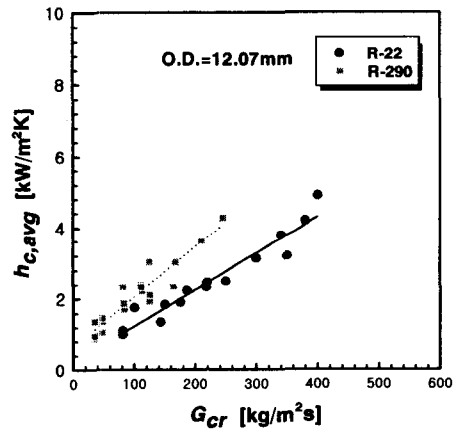


Fig. 7 Average condensation heat transfer coefficient to refrigerant mass velocity

4. 증발 전열 특성

냉수 유량변화에 따른 열평형을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서의 오차범위는 응축기와 마찬가지로 냉매의 종류와 열원수 유량변화에 관계없이 $\pm 10\%$ 내외에서 거의 일치하였다.

증발기에서 측정한 R-22, R-290의 구간별 냉매온도의 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 냉매의 흐름은 그림의 좌측방향에서 우측방향으로 진행된다. 그림에서 두 냉매의 온도는 구간 8 정도에서 과열이 발생하여 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이를 통하여 냉매의 증발이 완료되는 구간을 유추할 수 있었으며 이 구간 이후 온도가 급격히 상승하는 것은 증기가 관내 벽면에 다량으로 접촉함으로써 2차 유체와 열평형이 이루어지는 과정이기 때문일 것으로 생각된다. R-22에 비하여 R-290은 조금 짧은 구간에서부터 과열이 시작하는 것으로 관찰되었다. 이는 탄화수소계 냉매의 증발잠열 및 열전도도가 R-22에 비하여 우수하기 때문이

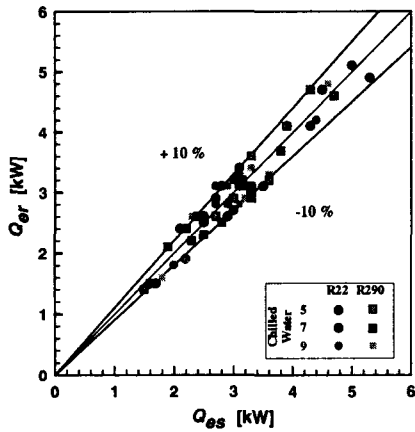


Fig. 8 Heat balance between Q_s and Q_r in the evaporator

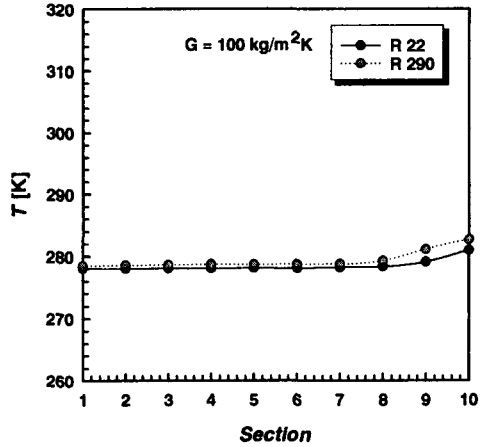


Fig. 9 Refrigerant temperature profiles in the evaporation

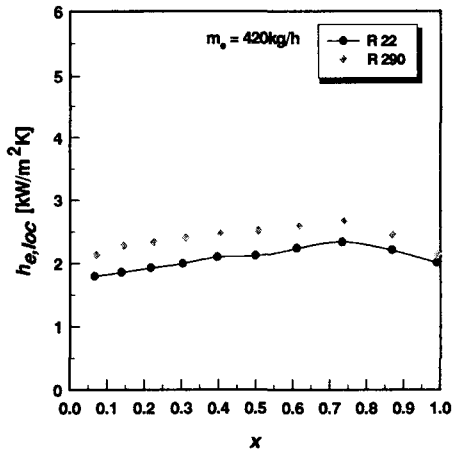


Fig. 10 Local evaporation heat transfer coefficient to quality

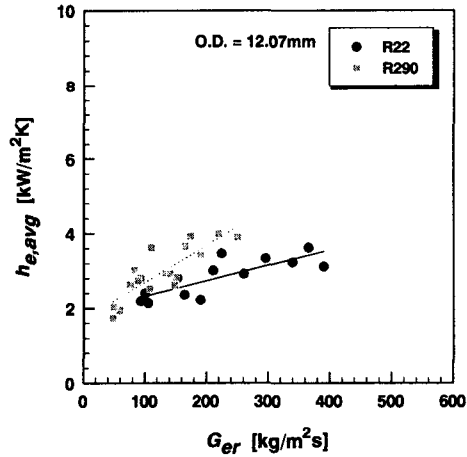


Fig. 11 Average evaporation heat transfer coefficient to refrigerant mass velocity

라고 생각할 수 있다.

Fig. 10는 각 냉매별 국소 증발 열전달 계수를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모든 냉매의 열전달 계수는 건도가 증가함에 따라 증가하다가 건도가 0.75정도 되는 영역 이후로 감소하는 경향을 보였다. R-290의 국소 증발 열전달 계수는 R-22보다 약간 높게 나타났으며 R-22와 유사한 경향을 나타내었다. 이로써 공조장치에 있어서 프레온계 냉매 R-22에 대하여 탄화수소계 냉매 R-290과 R-600a의 대체 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 질량유속에 대한 평균 증발 열전달 계수를 나타낸 것이다. 모든 냉매에서 질량유속에 비례하여 평균 증발 열전달 계수가 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. R-290을 R-22와 비교하여 저질량유속에서는 그 차이가 미미하였으나 고질량유속으로 갈수록 평균

증발 열전달계수가 점점 더 우수하게 나타나는 경향을 보였다.

5. 결 론

지구 환경 보호의 측면에서 R-22의 대체 냉매로 기대되는 탄화수소계 자연냉매인 R-290에 대한 응축 증발 전열 특성에 대하여 규명하고자 하였다. 본 응축 증발 전열 특성 실험을 수행한 결론은 다음과 같다.

R-290의 냉매 온도 분포 및 열전달계수가 R-22와 흡사한 일반적 경향을 나타내는 것을 알 수 있었다. 특히 R-290은 R-22와 비슷하거나 오히려 우수한 응축 증발 전열 성능을 나타내었고 환경적으로도 안전한 냉매이므로 열역학적으로 볼 때 R-22를 대체할 수 있는 자연 냉매라 사료된다.

참고문헌

1. Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes : Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone, Nature, Vol. 249, pp. 810~814.
2. Kurylo, M. J., 1990, The Chemistry of Stratospheric Ozone : Its Response to Natural and Anthropogenic Influences, Int. J. Ref., Vol. 13, pp. 62~72.
3. Ebner, T. and Halozan, H., 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.
4. James, R. W. and Missenden, J. F., 1992, The Use of Propane in Domestic Refrigerators, Int. J. Ref., Vol. 15, No. 2, pp.95~100.