터보냉동기용 만액식 증발기에 사용되는 성형가공관의 풀비등 성능

Pool boiling performance of an enhanced tube used in flooded refrigerant evaporator for turbo-refrigerator

김 태 형*, 김 내 현**
T. H. Kim, N. H. Kim

Key Words: Pool boiling(풀비등), Enhanced tube(전열촉진관), Metal-formed tube(성형가공관), Alternative refrigerant(대체냉매)

ABSTRACT

Pool boiling performance of a metal-formed enhanced tube for a flooded refrigerant evaporator was experimentally investigated. Tests were performed for three different refrigerants(R-11, R-123, R-134a), at two different saturation temperatures 4.4℃ and 26.7℃. Heat flux was varied from 10 kW/m^2 to 50 kW/m^2. Compared with the heat transfer coefficients of the smooth tube, the heat transfer coefficients of the enhanced tube were 6.6 times higher for R-11, 6.0 times higher for R-123 and 3.5 times higher for R-134a. The enhancements are comparable with those of foreign products. The heat transfer coefficients of R-134a were higher than those of R-11 and R-123, either for the enhanced tube or for the smooth tube. At 4.4℃ saturation temperature, however, the heat transfer coefficients of R-134a were approximately the same as those of R-11. The effect of the saturation pressure on the boiling performance was similar to that of the smooth tube - the heat transfer coefficient increases as the saturation pressure increases.

기 호 설 명

A : 전열면적 [m^2]
D : 전열관 외부 직경 [m]
D_b : 기포이탈직경 [m]
g : 중력가속도 [m/s^2]
h : 열전달계수 [W/m^{2}K]
k : 열전도계수 [W/mK]
L : 전열관 길이 [m]
M : 몰질량 [kg/kmol]
P_{crit} : 임계압력 [kPa]
P_{red} : 환산압력 (=P/P$_{crit}$)
Pr : Prandtl수
Q : 전열량 [W]
q'' : 열유속 [W/m^2]
R_p : 표면조도 [m]
T : 온도 [K]

그리스 문자

β : 접촉각 [deg]

* 인천대학교 대학원
** 정회원, 인천대학교 기계공학과

ρ : 밀도 [kg/m^3]
σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

f : 포화액
g : 포화증기
sat : 포화
w : 관벽

1. 서론

중대형 터보냉동기의 증발기는 만액식 쉘-튜브형 열교환기로 관외측에서 냉매가 증발하며 관내를 흐르는 순환수를 냉각한다. Fig. 1에 만액식 증발기의 개략도가 나타나 있다. 냉매는 증발기 하부에서 약 15%의 건도로 유입되어 관군을 지나면서 증발하여 증발기 상부에서 포화증기 상태로 압축기로 보내진다. 냉매와 순환수의 열교환은 전열관을 통하여 이루어지는데 그간 평관이 주로 사용되어 왔으나 최근 들어 비등성능이 우수한 성형가공관을 많이 사용하고 있다. 성형가공관은 평관을 성형가공하여 제작하는데 추가 가공공정으로 인하여 가격은 다소 상승하나 전열성능을 크게 향상시킬 수 있어 평관에 비하여 충분히 경제성이 있는 것으로 알려져 있다.[1] 본 연구에서 실험한 성형가공관의 확대사진과 공동의 제원이 Fig. 2(a)에 나타나 있다. 이 성형가

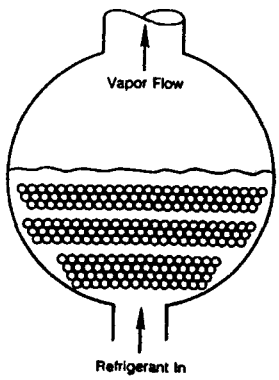
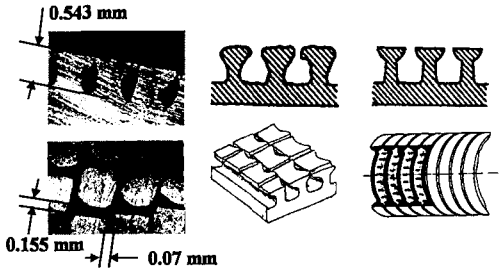


Fig. 1 A sketch of flooded refrigerant evaporator.



(a) Present metal-formed tube (b) Turbo-B (USA) (c) GEWA-T (Germany)

Fig. 2 A Photograph of the present metal-formed tube along with those from foreign manufactures.

공관은 42 fpi(fins per inch)의 낮은 핀관의 외측 핀을 축방향으로 커팅한 후 핀상부를 롤러로 눌러 핀 사이에 미세 공동을 형성한 성형관이다. 이러한 형태로 제작되는 관은 미국 Wolverine사의 Turbo-B와 독일 Wieland사의GEWA-T등이 있는데 이들 관의 비등성능은 잘 알려져 있는 반면[2] 국산 성형가공관의 성능은 알려진 바 없다.

터보냉동기용 증발기 외측의 전열현상은 기포형성에 따른 핵비등에 냉매 흐름에 따른 대류효과가 부가되는 대류 비등으로 특성 지을 수 있는데[3], 이러한 대류 비등 현상을 이해하기 위해서는 핵비등(또는 풀비등)에 대한 이해가 우선되어야 한다. 또한 그간 터보냉동기에는 R-11이 주로 사용되어 왔으나 CFC 규제에 따라 신냉매인 R-123 이나 R-134a 로 바뀌고 있다.[4] 따라서 본 연구에서는 터보냉동기의 증발기 설계 기술 구축의 일환으로 국산 성형가공관의 신냉매에 대한 풀비등 성능을 실험을 통하여 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 3에 실험장치의 개략도를 나타내었다.시험부는 직경 150 mm, 길이 350 mm의 동관으로제작되어 일단에는 시험전열관이 장착되고 다른 단에는 관측창을 설치하여 비등현상을 관측하고 수위를 계측할 수 있도록 하였다. 시험부에서 증발

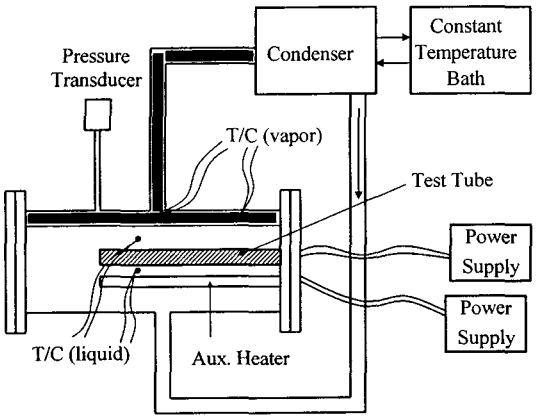


Fig. 3 Schematic drawing of the experimental apparatus.

한 증기는 상부에 위치한 응축기에서 응축된 후 시험부 하부로 되돌아온다. 응축기는 쉘-튜브형 열교환기로 관 내측에는 3RT급 항온수조로부터 공급되는 브라인이 흐르며 관 외측의 냉매증기를 응축시킨다. 실험은 터보냉동기용 증발기의 작동온도인 포화온도 4.4℃와 상온(26.7℃)의 두 온도에서 수행되었다.

시험 전열관의 상세도가 Fig. 4에 보여진다. 전열관의 비등성능을 알기 위해서는 관벽온도를 측정하여야 한다. 관벽온도는 일반적으로 관벽사이에 열전대를 심고 이로부터 측정된 온도를 외삽하여 구한다. 하지만 실제 성형가공관의 경우는 관벽두께가 1 mm 미만으로 얇기 때문에 열전대를 심을 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 외경 18.8 mm, 내경 13.5 mm의 동봉을 성형가공하여 특별 제작하였다.

시험 전열관의 내측에는 시험 전열부에 꼭 맞는 외경 13.45 mm의 히터를 장착하였다. 히터는 발열부가 시험 전열관과 길이 방향으로 일치하도록 특별 제작하였다. 히터 삽입시 전열관과 히터 사이에는 thermal epoxy를 발라 열전달이 원활히 이루어지도록 하였다. 또한 시험 전열관의 앞뒤는 테프론 마개와 링으로 측부 열손실이 최소화 되도록 하였다. 열전대 구멍은 시험부 상부로부터 1.3 mm 떨어진 지점에 직경 1.0 mm, 깊이 85 mm로 상하좌우 네 곳에 가공되었다. 구멍에 열전대를 삽입할 때는 열전대를 thermal epoxy에 충분히 묻힌 후 삽입하여 열전대와 구멍 사이에 빈 공간이 없도록 하였다. 냉매액의

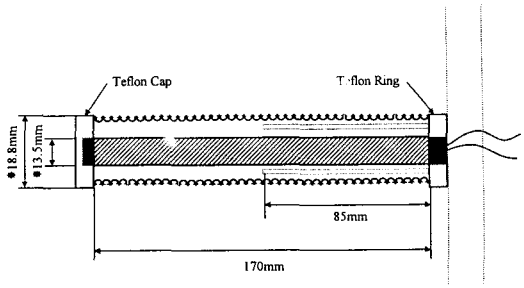


Fig. 4 Detailed sketch of the test tube.

온도와 증기온도는 각각 두 곳씩 네 곳에서 측정하였다. 액의 온도는 전열관 상하 각각 20 mm 떨어진 곳에서, 증기온도는 시험부 상부에서 측정되었는데 시험중 이 네 온도는 0.2℃ 이내에서 일치하였다. 또한 압력트랜스듀서로 측정된 압력으로부터 환산된 포화온도와 비교하였을 때 이들은 0.3℃ 이내에서 일치하였다. 온도 측정은 직경 0.13 mm의 가는 Cu-Co 열전대로 이루어졌다.

2.2 실험방법

비등 현상은 전열표면의 상태에 매우 민감하게 반응하므로 매 실험시 표면의 상태를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Bergles와 Chyu[5]가 제안한 방법을 따랐다. 우선 시험 전열관을 최대 열유속(약 50 kW/m²)에서 한 시간 가량을 비등시켜 전열관과 액 중의 잔류가스를 제거한 후 열유속을 천천히 0 kW/m²까지 감소시킨다. 다음 30분간 보조히터(포화온도 26.7℃ 일 경우) 또는 항온수조내의 냉동기(포화온도 4.4℃ 일 경우)를 작동시켜 포화온도를 유지시킨다. 그 후 시험 전열관의 열유속을 천천히 증가시켜 최대 열유속까지 증가시킨다. 최대 열유속에서 정상상태가 되면 벽면 온도와 포화액, 포화증기온도 그리고 포화압력을 측정한다. 이 후 열유속을 일정량 감소시켜가며 온도와 압력을 측정한다. 온도 측정시 보조히터는 꺼서 보조히터에 의한 유동이 시험부에 영향을 미치지 않도록 하였다. 열유속을 변화시킨 후 정상상태 까지는 대략 5분 정도 소요되었다. 시험 중 액의 수위는 전열관 상부 5 cm를 유지하도록 하였다. 시험 전열관은 시험 전 아세톤으로 깨끗이 닦은 후 실험에 임하였다. 본 실험에서 시험 전열관의

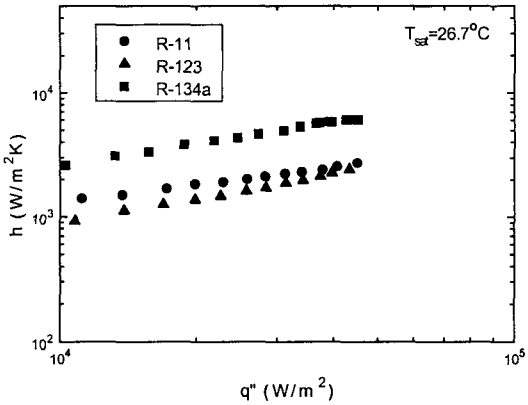


Fig. 5 Boiling heat transfer coefficient of the smooth tube at T_{sat}=26.7℃.

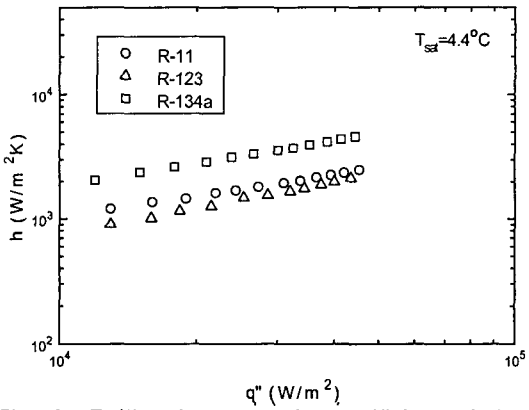


Fig. 6 Boiling heat transfer coefficient of the smooth tube at T_{sat}=4.4℃.

관벽온도는 관 내벽에 심은 네곳의 열전대로부터 측정된 온도를 외삽하여 구하였다. 관벽온도를 정확하게 알기 위해서는 가능한한 많은 곳에서 온도를 측정하면 좋지만, 이 경우 열전대 구멍을 너무 많이 가공하면 관벽내의 열전도에 영향을 미치므로 일반적으로 서너개소 정도에서 측정한다.[6,7] 관벽온도 측정시 또 한가지 유의해야 할 사항은 관의 길이 방향으로의 온도 변화이다. 관 양단에서는 측부 열손실에 따라 관벽온도가 다소 내려갈 수 있다. 이를 확인하기 위하여 열전대 위치를 길이 방향으로 변화시키며 온도 변화를 측정하였는데 열전대의 위치가 열전달계수에 미치는 영향은 6% 이내로 무시할 만 하였다. 따라서 본 연구에서는 열전대를 관의 중심부에 위치하도록 하고 온도를 측정하였다.

본 실험에서 열전달계수는 다음 식으로 정의된다.

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_{sat})} \quad (1)$$

여기서 T_w는 관벽 주위의 온도를 평균낸 값이고 T_{sat}은 포화액과 증기의 온도를 평균낸 값이다. 열전달 면적 A는 전열관의 최외곽 직경 D로 정의되는 공칭면적(= πDL)을 사용 하였다. 실험의 오차해석을 Kline 과 Mclintock[8]의 방법에 따라 수행하였다. 열전달계수의 오차는 열유속 40 kW/m²에서 3%, 10 kW/m²에서 7% 정도가 되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평활관

실험의 신뢰도를 확인하고 성형가공관과의 비교를 위하여 평활관에 대한 실험을 수행하였다. 평활관의 경우 표면을 가는 사포(입도1000)로 갈아 일정한 표면 거칠기가 되도록 하였다. 일반적으로 구리관의 표면은 검붉은 색을 띄고 있는데 이는 표면이 공기 중의 산소와 반응하여 산화막을 형성하기 때문이다. 이 표면을 사포로 갈아내면 반짝이는 구리 표면이 되는데, 이 경우 비등 성능은 산화막이 형성된 후의 비등성능과 다를 수 있다.[9] 본 연구에서는 산화막의 영향을 살펴보기 위하여 사포질한 평활관에 대하여 반복실험을 수행하였는데 시간이 갈수록 비등성능이 감소하다 수 일 후에야 일정한 값을 유지하는 것을 확인하였다. 이는 비등실험시 표면상태의 중요성을 다시 한 번 일깨워 주는 현상으로, 본 연구에서는 비등표면을 충분히 산화시킨 후 실험에 임하였다.

Fig. 5에 포화온도 26.7℃에서 평활관의 비등성능이 나타나있다. 이 그림은 R-11과 R-123의 열전달계수는 유사한 반면 R-134a의 열전달계수는 월등히 높음을 보여준다. 이는 R-134a의 포화압력이 높기 때문으로 여타 연구자의 보고[2,7]와 일치하는 결과이다. 포화압력이 높으면 포화증기압선(온도-압력선도)의 기울기가 커지고 따라서 초기 비등시 요구되는 벽면 과열도는 감소

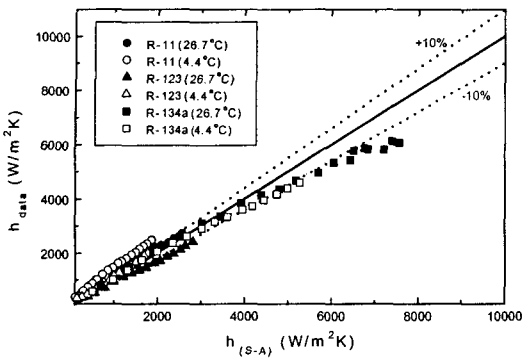


Fig. 7 Smooth tube data compared with Stephan-Abdelsalam[10] correlation.

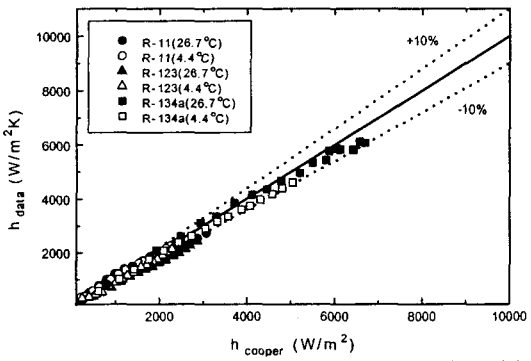


Fig. 8 Smooth tube data compared with Cooper[11] Correlation.

하게 된다.[10] Fig. 6에는 포화온도 4.4℃의 결과가 나타나있다. 이 그림도 Fig. 5와 같은 경향을 보인다. 열전달계수는 전반적으로 26.7℃의 경우보다 낮은데 이도 포화온도의 감소에 따른 포화압력의 감소 때문이다.

평활관에서 냉매의 풀비등 성능을 잘 예측하는 것으로 알려진 상관식으로는 Stephan 과 Abdelsalam[11], Cooper[12]가 있다. Fig. 7에는 Stephan과 Abdelsalam의 상관식과 비교한 결과가, Fig. 8에는 Cooper의 상관식과 비교한 결과가 나타나 있다. 이 그림들은 Cooper의 상관식이 실험결과를 좀 더 잘 예측하는 것을 보여주는데, Jung et al.[7]도 유사한 결과를 보고한 바 있다. 두 상관식은 다음과 같다.

Stehpan 과 Abdelsalam 상관식 :

$$h = 207\frac{k_f}{D_b}\left(\frac{q''\,D_b}{k_f T_{sat}}\right)^{0.745}\left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{0.581}\mathrm{Pr}^{0.533} \qquad (2)$$

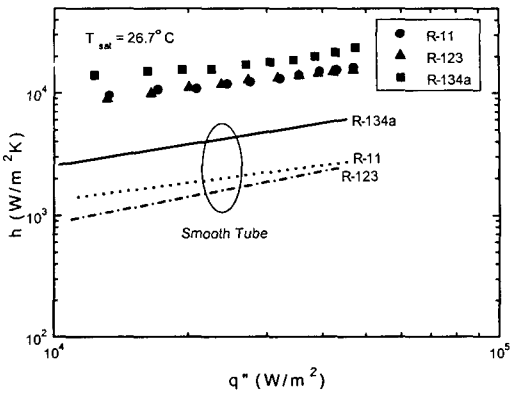


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficient of the present metal-formed tube at T_{sat}=26.7℃.

여기서 $D_b = 0.0146\beta\sqrt{2\sigma/(g(\rho_f-\rho_g))}$ 이다.

Cooper 상관식 :

$$h = 90\ q''^{\,2/3} M^{-0.5} P_{red}{}^{m}(-\log_{10} P_{red})^{-0.55} \qquad (3)$$

여기서 $m = 0.12 - 0.2\log_{10} R_p$ 이며 R_p=0.3 (μm)을 사용하였다.

3.2 성형가공관

Fig. 9는 포화온도 26.7℃에서 성형가공관(Fig. 2(a))의 비등성능을 보여준다. 이 그림도 평활관의 경우와 유사하게 R-134a의 성능이 높게 나타남을 보여준다. Fig. 9에는 평활관의 실험자료도 나타나 있다. Fig. 10은 포화온도 4.4℃에서의 비등성능을 보여준다. 이 그림은 R-11과 R-134a의 열전달계수가 유사하고 R-123보다는 다소 높음을 보여준다. 이는 평활관이나 포화온도 26.7℃에서의 성형가공관의 결과와는 다소 상이한데 Webb과 Pais[2]도 Turbo-B에 대한 실험에서 유사한 결과를 얻었다. 본 성형가공관의 형상은 Fig. 2에도 나타나 있듯이 Turbo-B와 유사한 기공형태를 가지고 있다. 전열촉진관의 비등은 기공형태와 밀접한 관련이 있으므로 기공의 형상이 이러한 경향과 관계가 있을 것으로 생각되나 그 이유는 아직 명확하지 않다. Fig. 10에는 평활관의 실험자료가 보이는데 증발기 작동 열유

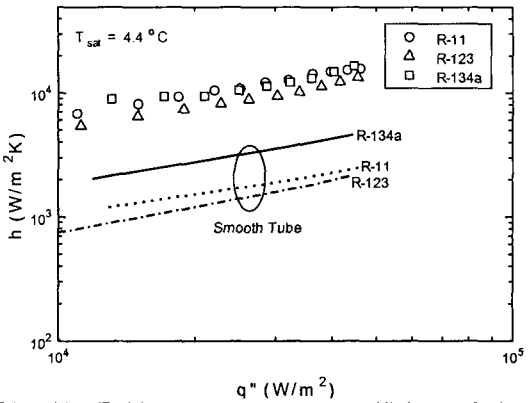


Fig. 10 Boiling heat transfer coefficient of the present metal-formed tube at T_{sat}=4.4℃.

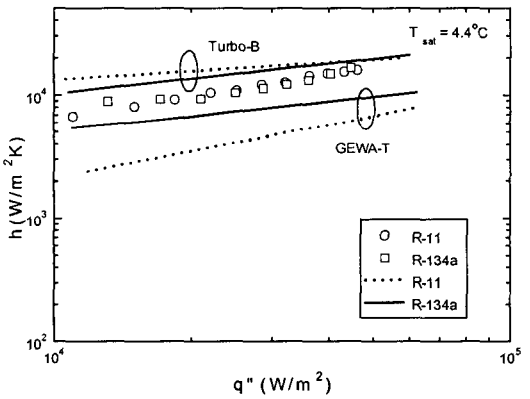


Fig. 11 Boiling heat transfer coefficient of the present metal-formed tube compared with those of Turbo-B and GEWA-T at T_{sat}=4.4℃.

속인 40 kW/m²에서 성형촉진관은 평활관에 비하여 R-11의 경우는 6.6배, R-123의 경우는 6.0배 그리고 R-134a의 경우는 3.5배 정도 열전달을 촉진시킴을 알 수 있다. 본 성형가공관의 열전달 성능을 Turbo-B와 GEWA-T의 성능[2]과 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은 본 성형가공관의 성능이 Turbo-B보다는 다소 떨어지나 GEWA-T보다는 우수함을 보여준다. Fig. 11에 나타난 Turbo-B와 GEWA-T의 자료는 Webb과 Pais[2]의 논문에 제시된 관계식으로부터 구하였다. 그들은 열전달계수를 열유속의 함수로 커브피팅한 관계식을 보고하였는데 Table 1에 그 관계식이 나타나 있다.

Table 1 Curve fits of experimental data in the form $h = cq''^{n}$

Tube	refrigerant	T_{sat}=4.4℃		T_{sat}=26.7℃	
		c	n	c	n
Present Tube	R-11	24.55	0.604	162.2	0.427
	R-123	16.22	0.622	158.5	0.428
	R-134a	67.61	0.506	398.1	0.373
GEWA-T	R-11	1.50	0.779		
	R-134a	105.05	0.423		
Turbo-B	R-11	830.46	0.298		
	R-134a	304.44	0.389		

평활관의 풀비등 전열성능에 대해서는 그간 많은 연구가 되어 왔고 이론적 모델 상관식도 다수 존재한다. 하지만 성형가공관의 경우 열유속, 물성치외에도 공동의 크기, 형상등 여러인자가 비등에 관련되고 따라서 이에 대한 이론적 연구[13,14], 상관식[15,16]등은 제한되어 있는 형편이다. 본 연구에서는 단일 형상의 성형가공관에 대하여 실험을 수행하였으므로 일반 상관식 개발보다는 실험자료를 열유속의 형태로 커브피팅하였고 Table. 1에 그 결과를 수록하였다.

4. 결론

본 연구에서는 터보냉동기용 증발기의 전열촉진관으로 개발된 성형가공관의 풀비등 성능을 여러 냉매(R-11, R-123, R-134a)에 대하여 실험하였다.

주된 결론은 다음과 같다.

(1) 본 성형가공관의 비등열전달계수는 증발기 작동 조건(포화온도 4.4℃, 열유속 40 kW/m²)에서 평활관보다 R-11의 경우는 6.6배, R-123은 6.0배 그리고 R-134a는 3.5배 정도 높음을 보여준다. 이는 외국의 전열촉진관들과 비교할 만한 수준이다.

(2) R-134a에서 항상 높은 열전달계수를 나타내는 평활관과는 달리 성형가공관은 포화온도에 따라 서로 다른 경향을 보인다. 포화온도 26.7℃에서는 R-134a가 R-11보다 높은 열전달계수를 보이나 4.4℃에서는 두 값이 유사하였다.

(3) 성형가공관도 평활관과 마찬가지로 냉매의 포화압력이 올라갈수록 열전달계수가 증가한다.

후 기

본 연구는 에너지자원 기술개발지원센터의 1998 년도 에너지 기술개발 학술진흥사업의 일환으로 수행되었습니다. 성형가공관은 현대기공(주)에서 제작되었습니다. 관계되신 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Webb, R. L., 1994, Principles of Enhanced Heat Transfer, Wiley Inter Science.
2. Webb, R. L. and Pais, C., 1992, "Nucleate pool boiling data for five refrigerants on plain, integral-fin and enhanced tube geometries," Int. J. Heat Mass Trains., Vol. 35, No. 8, pp. 1893-1904.
3. Webb, R. L., Choi, K-D. and Apparao, T. R., 1989, "A theoretical model for prediction of the heat load in flooded refrigerant evaporators," ASHRAE Trans., Vol. 95, pt. 1, pp 326-348.
4. 김춘동, 이현구, 이용덕, 정진희, "R134a 터보 냉동기 성능시험 - Part 1 : 성능시험 절차," 1999, 공기조화 냉동공학회 '99 하계학술발표회 논문집, pp. 1048-1053.
5. Bergles, A. E. and Chyu. M. C., 1982, "Characteristics of nucleate pool boiling from porous metallic coatings," J. Heat Transfer, Vol. 104, pp. 279-285.
6. Sukhatme, S. P., Jagadish, B. S. and Prabhakaran, P., 1990, "Film condensation of R-11 vapor on single horizontal enhanced condenser tubes," J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 229-234.
7. Jung, D., Kim, C-B., Song, K-H. and Lee, J-K., 1998, "Nucleate boiling heat transfer coefficients of pure refrigerants," Heat Transfer 1998, Proceedings of 11th IHTC, Vol. 2, August 23-28, Kyoungju, Korea.
8. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "The description of uncertainties in single sample experiments," Mechanical Engineering. Vol. 75, pp. 3-9.
9. Imadomeju, H. E., Hong, K. T. and Webb. R. L., 1995, "Pool boiling of R-11 refrigerant and water on oxidized enhanced tubes," J. Enhanced Heat Transfer, Vol. 2, No. 3, pp. 189-198.
10. Collier, J. G. and Thome, J. R, 1996, Convective Boiling and Condensation, 3rd ed., Clarendon Press, Oxford.
11. Stephan, K., and Abdelsalam, M., 1980, "Heat transfer correlations for natural convection boiling," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 73-87.
12. Cooper, M. G., 1982, "Correlations for nucleate boiling-formulation using reduced properties," Physico-Chemical Hydrodynamics, Vol. 3, No. 2, pp. 89-111.
13. Nakayama, W., Daikoku, T., Kuwahara, H. and Nakajima, T., 1980, "Dynamic model of enhanced boiling heat transfer on porous surfaces, part II: analytical modelling," Journal of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 451-456.
14. Chien, L-H., Webb, R. L., 1998, "A nucleate boiling model for structured enhanced surfaces," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, No. 14, pp. 2183-2195.
15. Nishikawa, K. Ito, T. and Tanaka, K., 1983, "Augmented heat transfer by nucleate boiling at prepared surfaces," Proceedings of the 1983 ASME-JSME Thermal Engineering Conference, Vol. 1, pp. 387-393.
16. Ayub, Z. H. and Bergles, A. E., 1987, "Pool boiling from GEWA surfaces in water and R-113," Wärme-und-Stoffübertragung, Vol. 21, pp. 209-219.