

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.5.275>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

다공판을 사용한 R-123 풀비등 열전달 촉진

김 내 현*†

* 인천대학교 기계시스템공학부

Pool Boiling Enhancement of R-123 Using Perforated Plates

Nae-Hyun Kim*†

* Div. of Mechanical System Engineering, Incheon Nat'l Univ.

(Received October 31, 2015 ; Revised January 21, 2016 ; Accepted March 6, 2016)

Key Words: Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Heat Transfer Enhancement(열전달촉진), Perforated Plate(다공판), Pool Boiling (풀 비등)

초록: 본 연구에서는 비등표면 위에 다공판을 설치하여 풀비등을 촉진시키는 방안에 대하여 검토하였다. 실험은 대기압에서 R-123을 사용하여 수행되었다. 다공판은 풀비등을 현저히 촉진시켰다. 이는 다공판이 기포를 비등표면 위에 넓게 퍼뜨려 기포와 비등표면 사이 액막의 면적을 증가시키기 때문이다. 또한 높은 열유속에서는 다공도가 클수록, 낮은 열유속에서는 다공도가 작을수록 비등이 촉진되었다. 본 연구에서는 구멍 직경 2.0 mm, 구멍 간격 2.5 mm×5.0 mm 또는 5.0 mm×5.0 mm, 비등 표면과의 간격 0.5 mm에서 최적 형상이 얻어졌고 이 형상들의 열전달계수는 상용 GEWA-T의 값에 근접하였다. R-123에서의 최적 다공도는 물이나 에탄올에서 보다 현저히 큰데 이는 R-123의 밀도비가 크고 증발잠열은 작기 때문이다. 한편 다공판의 비등이력은 평판보다 작았다.

Abstract: In this study, we investigate the pool boiling enhancement caused by perforated plates on top of a smooth surface. We conduct tests using R-123 at atmospheric pressure. It was shown that perforated plates significantly enhanced the pool boiling of the smooth surface. The reason may be attributed to the increased bubble contact area between the plates. The results showed that the enhancement ratio was dependent on the heat flux. At high heat flux, the enhancement ratio increased as the porosity increased. However, at low heat flux, the enhancement ratio decreased as the porosity increased. For the present investigation, the optimum configuration had a pore diameter of 2.0 mm, pore pitch of 2.5 mm×5.0 mm or 5.0 mm×5.0 mm, and a gap width of 0.5 mm, which yielded heat-transfer coefficients that are close to those of GEWA-T. The optimum porosity for R-123 was significantly larger than that of water or ethanol. The reason for this may be the large liquid-to-vapor density ratio along with the small latent heat of vaporization of R-123. The perforated plates yielded smaller boiling hysteresis compared with that of the smooth surface.

- 기호설명 -

d : 직경 (m)

g : 간격 (m)

p : 핏치 (m)

q : 열유속 (kW/m^2)

t_l : 세로방향 핏치 (m)

t_2 : 가로방향 핏치 (m)

T_{sat} : 포화온도 (K)

T_w : 벽면온도 (K)

ε : 다공도

1. 서론

풀비등은 냉동기나 화학 공정의 중요한 열전달 기구로 이를 촉진하기 위한 연구는 지난 수십년간 지속적으로 수행되어 왔고 그 결과 상용 비등 전

† Corresponding Author, knh0001@incheon.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

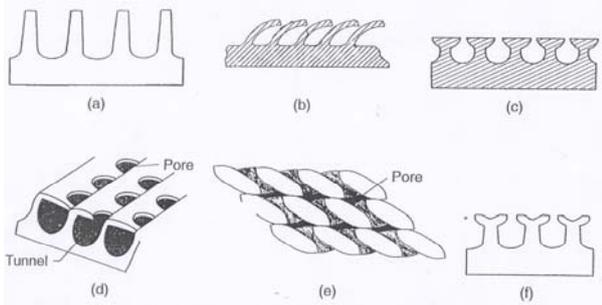


Fig. 1 Surface geometry of enhanced tubes: (a) low-fin (b) bent-fin (c) GEWA-T (d) Thermoexel (e) Turbo-B (f) GEWA-SE

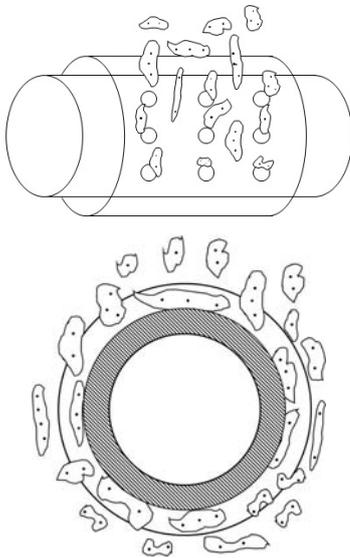


Fig. 2 Sketch of boiling in a perforated tube

열축진관도 다양하게 존재한다.⁽¹⁻³⁾ 상용 전열축진관은 평활관을 가공하여 표면에 재돌입 공동을 형성하거나(Fig. 1 참조) 평활관 표면에 작은 금속입자를 소결하여 제조된다.⁽⁴⁻¹⁰⁾ 성형이나 소결로 형성된 재돌입 공동은 기포 생성 과열도를 낮추고 안정된 기포 형성을 유발한다. 또한 성형이나 소결시 형성된 하부 터널에서의 액막 증발은 비등 열전달을 현저히 증가시키는 주된 메카니즘이다.^(1,4)

일반적으로 전열축진관은 초기 냉동기 제조시 장착된다. 하지만 때로는 기존 평활관 증발기의 비등 성능을 향상 시킴으로써 냉동기의 싸이클 효율을 증가시킬 수 있다. Enshen 등⁽¹¹⁾은 평활관 외측에 동심원의 다공관을 설치하여 평활관에서의 비등을 촉진하는 방안을 검토하였다. Fig. 2에 그들의 시험부 개략도를 나타내었다. 평활관에서 발생한 기포가 외측의 다공관에 도달하면 기포는 더 이상 위로 성장하지 못하고 평활관과 다공관 사이에서 퍼지게 된다. 그러다가 다공관에 가공된 구

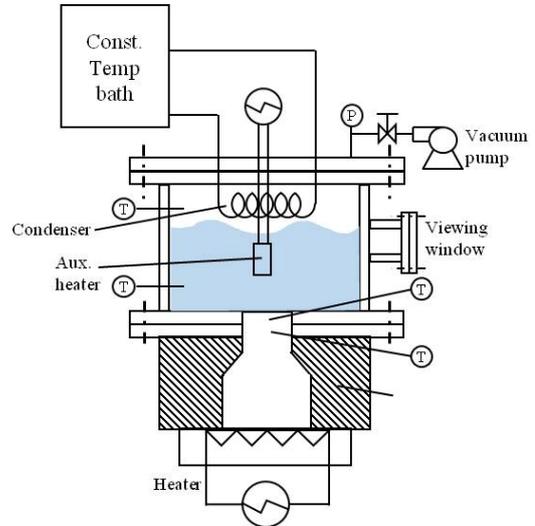


Fig. 3 Schematic drawing of the apparatus

멍을 만나게 되면 기포의 일부는 빠져나가고 인접 구멍으로 외부의 액체가 유입된다. 기포 성장시 기포 하부와 평활관 사이에는 액체와 벽면의 흡착력에 의하여 액막이 형성되는데 이 막은 얇고 그 면적은 넓으므로 열전달이 촉진된다. Enshen 등⁽¹¹⁾은 물과 에탄올에 대하여 실험하였는데 물의 경우는 구멍 직경 1.2 mm, 구멍 간격 14 mm, 평활관과 다공관의 간격 0.5 mm에서 최대 열전달계수를 얻었다. 에탄올의 경우는 구멍직경 2.0 mm, 구멍 간격 14 mm, 평활관과 다공관의 간격 0.5 mm에서 최대 열전달계수를 얻었는데 그 값은 상용 전열축진관의 열전달계수와 비교할 만 하였다.

본 연구에서는 다공관을 평관 위에 설치하고 풀비등 실험을 수행하였다. 평관은 평활관보다 기본적인 형상이고 비등 촉진이 요구되는 전자 칩 등은 평관 형상을 하고 있다. 냉매로는 R-123을 사용하고 대기압(포화온도 27.8°C)에서 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 3에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 시험부는 내경 250 mm, 길이 300 mm, 두께 10 mm의 SUS 재질의 원통으로부터 제작하였고, 양단의 플랜지에는 히팅블럭과 응축기 그리고 보조 히터를 장착하였다. 히팅 블럭과 플랜지 사이에는 O-ring을 설치하고 에폭시로 마감처리하여 기밀을 유지시켰다. 시험부 측면에는 유리로 된 관찰창을 설치하여 비등현상을 관찰할 수 있도록 하였다. 시험부에서 증발한 증기는 상부의 응축기에서 응축하여 다시 시험부로 되돌아온다.

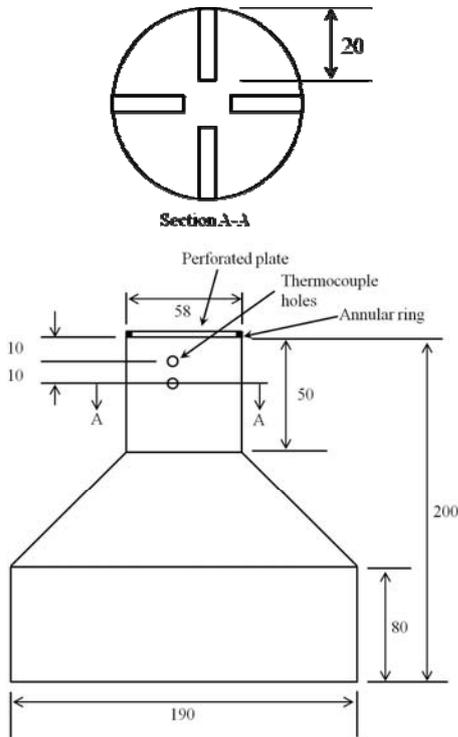


Fig. 4 Schematic details of the heating block (unit: mm)

응축기 내부를 흐르는 냉각수의 온도는 항온조로부터 조절되었다. 히팅 블록 하부에는 1 kW 용량의 복사 히터를 설치하여 시험부에 열량을 공급하였다. 히팅 블록의 밑바닥은 방사율을 높이기 위하여 그을음 처리하였고 주위로의 열손실을 최소화 하기 위하여 석면으로 단열하였다. 시험부의 다른 부분도 우레탄 폼으로 두껍게 단열하였다. 시험부 내에는 보조 히터를 설치하여 낮은 열유속에서도 포화온도를 유지하도록 하였다. 측정 시에는 보조 히터를 꺼서 보조 히터로 인한 2차 유동의 영향을 최소화하였다.

Fig. 4에 히팅 블록의 상세도를 나타내었다. 히팅 블록은 직경 190 mm의 알루미늄 봉을 Fig. 4와 같이 비등 표면의 직경이 58 mm가 되도록 제작하였다. 시험부에서의 열유속과 비등 표면 온도를 결정하기 위하여 표면으로부터 10 mm와 20 mm 하부에 각각 원주 방향으로 네 곳씩 직경 1.0 mm, 깊이 20 mm의 구멍을 가공하였다. 각 위치에서의 온도는 원주 방향 네 온도의 평균 값을 사용하였다. 온도는 T-type 열전대로 측정하였다. 열유속은 두 곳 온도의 기울기로부터 구하였고 비등 표면 온도는 두 온도를 외삽하여 구하였다. 포화액의 온도는 열전대를 비등 표면에서 5 cm 상부에 원주 방향으로 네 곳에 설치하여 측정하였고 포화 증기의 온도는 열전대를 포화액 상부 5 cm에 원주 방

Table 1 Hole configuration of perforated plates

no.	Hole size (mm)	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	Inline/Staggered	Porosity (ε)
1	1.2	10	10	I	0.011
2	1.4	10	10	I	0.015
3	2.0	10	10	I	0.031
4	3.0	10	10	I	0.071
5	4.0	10	10	I	0.13
6	2.0	5 (7.07)	10 (7.07)	S (I)	0.063
7	2.0	5	5	I	0.13
8	2.0	2.5 (3.54)	5 (3.54)	S (I)	0.25
9	2.0	2.5	2.5	I	0.50

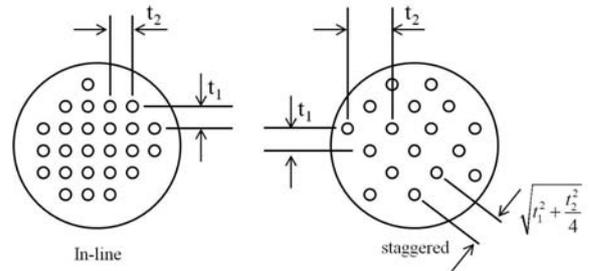


Fig. 5 Hole configuration of perforated plates

향으로 네 곳에 설치하여 측정하였다. 시험부 압력은 압력 트랜스듀서로 측정하였다. 시험 중 포화액 온도, 포화증기온도 그리고 포화압력으로부터 환산된 포화온도는 0.5°C 이내에서 일치하였다. 자료 처리시 포화온도로는 포화액의 온도를 평균하여 사용하였다.

다공판을 두께 0.5 mm의 동판을 드릴로 가공하여 제작하였다. Fig. 5에 사각 배열과 엇갈림 배열의 다공판 스캐치가 나타나 있다. 하지만 그림에 보여지듯이 t₁ × t₂의 엇갈림 배열은 핏치 $\sqrt{t_1^2 + t_2^2 / 4}$ 의 사각 배열과 동일한 형상이 된다. Table 1에는 본 연구에서 실험한 다공판의 제원이 나타나 있다. Table 1의 다공도(porosity)는 다공판 면적 중 구멍이 차지하는 비율을 나타낸다. 예를 들어 구멍 크기 2.0 mm, 구멍 간격 10 mm×10 mm인 다공판의 다공도 ε은 0.03이다. 본 연구에서는 비등 표면과 다공판 사이 간격의 영향도 검토하였다. 비등 표면과 다공판 사이 간격은 일정 두께의 환형 ring을 비등 표면과 다공판 사이에 삽입하여 유지하였다.

실험 절차는 다음과 같다. 시험부의 기밀을 확인한 후 진공 펌프를 사용하여 시험부 내의 공기를 제거한다. 진공 상태에서 액체 상태의 R-123을 약간 주입한 후 다시 1~2분간 진공 펌프를 작동

하여 냉매와 함께 공기를 제거한다. 이런 절차를 수 회 반복하여 공기를 완전히 제거한 다음 액체 상태의 R-123을 주입한다. R-123은 비등 표면에서 10 cm 높이까지 충전되었다. 비등 표면의 전처리에는 Bergles와 Chyu⁽¹²⁾가 제안한 방법을 적용하였다. 우선 비등 표면을 높은 열유속(50 kW/m²)에서 한 시간 가량 비등시킨 후 열유속을 천천히 0 kW/m²까지 내린다. 그 후 보조 히터를 사용하여 약 30분간 R-123 용액을 비등시킨다. 이 방법으로 비등 표면과 용액 중에 잔류해 있을 가스들을 배출시켰다. 실험은 열유속을 10 kW/m²씩 증가시키며 수행되었다.

온도는 열유속 증가 후 시스템이 안정되었다고 판단되었을 때 측정하였다. 비등 표면은 매번 실험 전 가는 사포(CW 800)로 갈아낸 후 아세톤으로 닦아내었다.

Kline과 McClintock⁽¹³⁾의 방법에 따라 실험의 불확실성에 대한 해석을 수행하였다. 비등 실험의 불확실성은 시편 가공의 불확실성과 온도 측정의 불확실성으로 나누어 생각할 수 있다. 시편 가공의 불확실성은 5.0%이고 온도 측정의 불확실성은 100 kW/m²의 높은 열유속에서는 5.2%, 5 kW/m²의 낮은 열유속에서는 15.3%로 나타났다. 따라서 비등 열전달계수의 불확실성은 높은 열유속에서는 7.1%, 낮은 열유속에서는 16.2%가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비등 이력 현상

Fig. 6에 다공판이 설치되지 않은 평판의 실험결과를 나타내었다. 실험은 우선 열유속을 증가시켜가며 수행하고 최고 열유속에 다다른 후에는 열유속을 감소시켜가면서 수행하였다. Fig. 6에는 Stephan과 Abdelsalm 상관식⁽¹⁴⁾의 예측치도 나타나 있는데 평판의 실험자료와 잘 일치함을 보인다. 열유속을 증가시켜가며 측정한 비등곡선과 열유속을 감소시켜가며 측정한 비등곡선이 일치하지 않는 경우 이를 비등 이력 현상이라 부른다. 비등 이력 현상은 비등 개시(ONB) 후 기포가 표면의 일부분에서 먼저 발생한 후 열유속을 증가시켰을 때 기포가 전체 표면으로 전파되기 때문에 발생한다. 육안으로 비등 현상을 관측한 결과 부분적으로 기포가 먼저 발생하고 열유속을 증가시켰을 때 기포가 전체 표면으로 퍼져나가는 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 비등 이력이 5 kW/m²에서 30 kW/m²에 걸쳐 일어남을 보인다.

Fig. 6에는 구멍 직경 2.0 mm, 5.0 mm×2.5 mm 엇

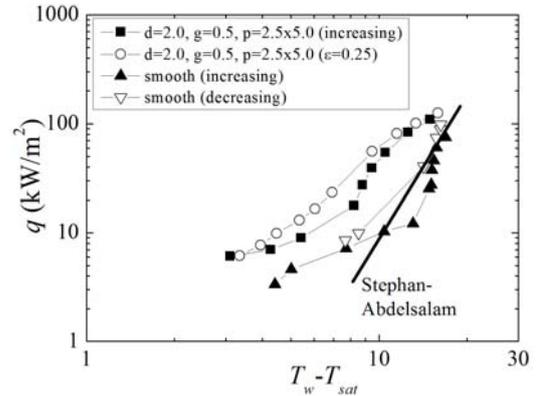


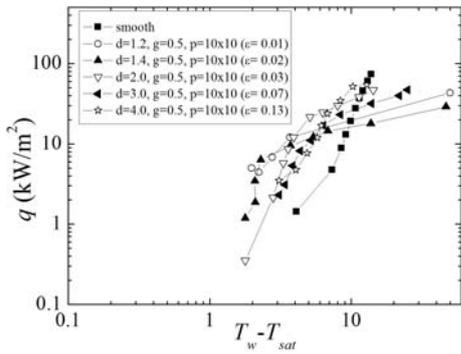
Fig. 6 Curves showing boiling hysteresis

갈림 배열의 다공판에 대한 실험 결과도 나타나 있다. 이 때 다공판과 비등 표면과의 간격은 0.5 mm이었다. Fig. 6는 다공판의 비등이력이 평판에 비하여 작음을 보여준다. 평판의 경우 상승 비등곡선과 하강 비등곡선의 벽면 과열도 차는 최대 4°C임에 반하여 다공판이 설치된 경우는 2°C 이내이다. 이는 다공판이 비등표면으로부터의 기포 이탈을 억제하고 기포들을 전체 표면으로 확산시키는 역할을 하기 때문으로 판단된다. Fig. 6은 다공판이 열유속 100 kW/m²까지 비등 열전달을 촉진시킴을 보여준다. 열유속이 증가할수록 촉진율은 감소하는데 이는 높은 열유속에서 천공판의 제한된 구멍으로 기포가 적절히 빠져나가지 못하기 때문으로 판단된다.

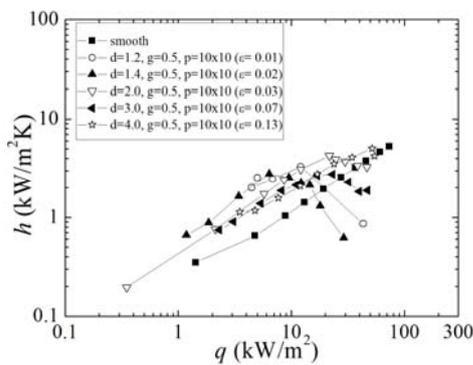
3.2 구멍 크기의 영향

Fig. 7에 구멍 크기를 1.2 mm에서 4.0 mm까지 (다공도 0.01에서 0.13까지) 변화시키며 실험한 결과가 나타나 있다. 이 때 구멍은 10 mm×10 mm의 사각으로 배열되었고 다공판과 비등표면의 간격은 0.5 mm이었다.

실험은 열유속을 감소시키며 수행되었다. Fig. 7(a)는 비등 곡선을, Fig. 7(b)는 열전달계수를 보여준다. 열전달계수(h)는 열유속(q)을 벽면과열도($T_w - T_{sat}$)로 나눈 값이다. Fig. 7은 비등곡선이 서로 교차됨을 보여준다. 낮은 열유속에서는 구멍이 (또는 다공도가) 작을수록 열전달계수가 크고 높은 열유속에서는 구멍이 (또는 다공도가) 클수록 열전달계수가 커짐을 보여준다. 다공판이 열전달을 촉진하려면 비등표면의 상당부분을 기포가 덮어서 기포와 비등표면 사이의 액막에서 연속적으로 증발이 일어나고 또한 발생한 기포가 적절히 다공판을 통하여 배출되어야 한다. 낮은 열유속에서 구멍이 너무 크면 기포가 다공판과 비등표면 사이에서 퍼질



(a) Boiling curves



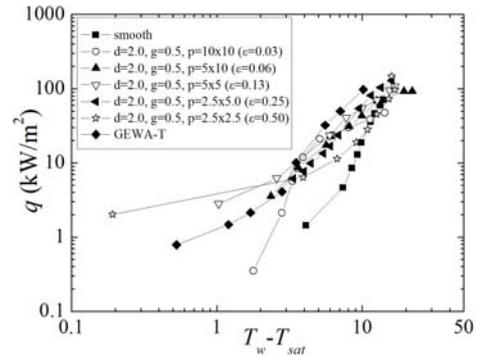
(b) Heat transfer coefficients

Fig. 7 Boiling curves and heat transfer coefficients showing the effect of hole size (porosity)

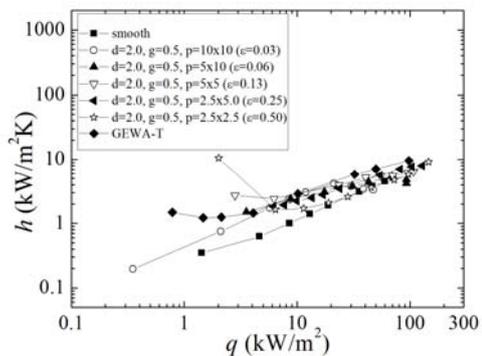
틈도 없이 구멍 밖으로 빠져나가게 되고 높은 열 유속에서 구멍이 너무 작으면 기포가 적절히 빠져나오지를 못하므로 열전달계수가 감소하게 된다. Chien과 Webb⁽⁶⁾도 다공관에서 R-11과 R-123 풀비등에 대하여 동일한 경향을 보고하고 있다. 일반적으로 만액식 증발기의 운전 열유속은 20 kW/m²에서 40kW/m²이다. Fig. 7은 이 열유속에서 구멍 직경 2.0 mm인 다공관이 가장 촉진 효과가 큼을 보여준다. 또한 Fig. 7은 구멍 크기가 커질수록 드 라이아웃 열유속이 증가함도 보여준다.

3.3 구멍 배열의 영향

구멍 크기가 같은 경우 구멍 수가 많아지면 기포의 배출이 용이하므로 높은 열유속에서 열전달 계수가 증가하리라 예측된다. Fig. 8에 구멍 크기 2.0 mm인 다공관에서 구멍 배열을 변경시키며(다공도를 0.03에서 0.50으로 변화시키며) 측정된 비등 곡선과 열전달계수를 나타내었다. 이 때 다공관과 비등 표면의 간격은 0.5 mm이고 실험은 열유속을 감소시키며 수행되었다. Fig. 8은 높은 열유속에서는 다공도가 증가할수록 열전달계수가 증가함을 보인다. 하지만 다공도가 너무 커지면($\epsilon =$



(a) Boiling curves



(b) Heat transfer coefficients

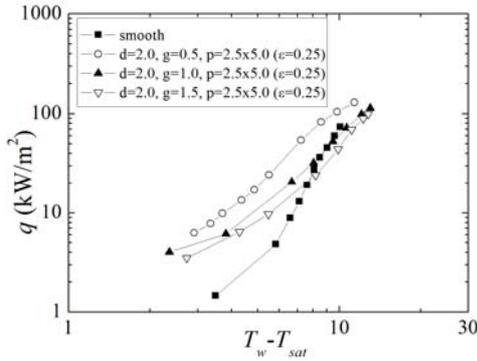
Fig. 8 Boiling curves and heat transfer coefficients showing the effect of hole configuration (porosity)

0.50) 열전달계수는 급격히 감소하여 평관의 값과 유사하게 된다. 낮은 열유속에서는 높은 열유속에서와 대체로 상반된 경향을 보인다. Fig. 8은 또한 열유속 10 kW/m²이하의 영역에서 다공관의 열전달 계수가 평관에 비하여 상당히 큼을 보여준다. 비등곡선의 형상은 이 영역이 자연대류 영역임을 암시하는데 이로부터 다공관이 자연대류도 현저히 증진시킴을 알 수 있다.

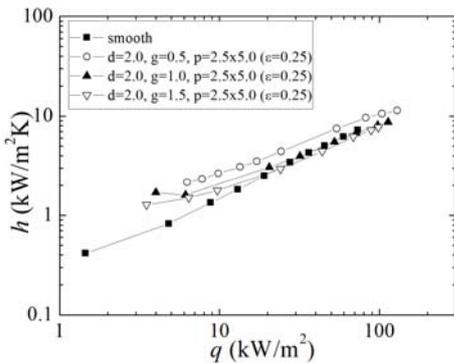
Fig. 8에는 상용 비등촉진관인 GEWA-T의 성능 곡선도 나타나 있다. GEWA-T는 Fig. 1에 보여지듯이 관의 외표면을 T형으로 가공한 관으로 만액식 냉동기의 증발기에 널리 사용되고 있다. Fig. 8은 배열 2.5 mm×5.0 mm 또는 5.0 mm×5.0 mm 다공관이 GEWA-T의 성능에 근접함을 보인다.

3.4 다공관과 비등표면 간격의 영향

Fig. 9에 다공관과 비등표면의 간격을 변화시키며 실험한 결과를 나타내었다. 다공관의 구멍 직경은 2.0 mm, 구멍 배열은 2.5 mm×5.0 mm이고 실험은 열유속을 감소시키며 수행되었다. Fig. 9는 간격 0.5 mm에서 1.5 mm 범위에서 간격이 작을수록



(a) Boiling curves



(b) Heat transfer coefficients

Fig. 9 Boiling curves and heat transfer coefficients showing the effect of gap width between perforated plate and heating wall

열전달계수가 증가함을 보여준다. 전술하였듯이 다공판이 열전달을 촉진하려면 비등표면의 상당부분을 기포가 덮어서 기포와 비등표면 사이의 액막에서 연속적으로 증발이 일어나고 또한 발생한 기포가 적절히 다공판을 통하여 배출되어야 한다. 다공판과 비등표면의 간격이 줄어들면 기포가 비등표면에 넓게 퍼지게 되고 따라서 열전달계수가 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 간격이 더욱 작아져 종국에 0이 되면 열전달계수는 평판의 값에 접근하리라 예상된다. 본 연구에서는 실험의 어려움으로 간격을 0.5 mm까지 밖에 감소시킬 수 없었다.

3.5 최적형상 비교

전술하다시피 Enshen 등⁽¹¹⁾은 평활관 외측에 다공판이 설치된 형상에 대하여 물과 에탄올을 사용하여 풀비등 실험을 수행하였다. 그들은 물의 경우는 구멍직경 1.2 mm, 구멍 배열 14 mm×14 mm, 비등표면과의 간격 0.5 mm에서, 에탄올의 경우는 구멍직경 2.0 mm, 구멍배열 14 mm×14 mm, 비등표면과의 간격 0.5 mm에서 열전달계수가 최대로 됨

을 보여주었다. 본 연구의 R-123의 경우는 구멍 직경 2.0 mm, 구멍 배열 2.5 mm×5.0 mm 또는 5.0 mm×5.0 mm, 비등표면과의 간격 0.5 mm에서 최대 열전달계수가 얻어졌다. 각각의 최적 형상을 다공도로 비교해 보면, 물의 경우는 0.006, 에탄올의 경우는 0.02, R-123의 경우는 0.16또는 0.32이다. 최적 다공도에 영향을 미치는 인자로는 액체와 기체의 밀도, 증발 잠열, 표면 장력과 접촉각 등 여러 인자가 있을 수 있으나 그 중 액체와 기체의 밀도비와 증발 잠열이 주된 영향을 미치리라 예상된다. 물의 경우 액체와 기체의 밀도비(대기압에서 572)가 작고 증발 잠열이 크기 때문에 기체의 발생량이 상대적으로 작아 다공도가 작은 형상이 유리하고 R-123의 경우는 밀도비(대기압에서 9418)가 크고 증발 잠열은 작기 때문에 기체 발생량이 많아져 다공도가 큰 형상이 유리하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 비등표면 위에 다공판을 설치하여 풀비등을 촉진시키는 방안에 대하여 검토하였다. 실험은 대기압에서 R-123을 사용하여 수행되었다. 주된 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 다공판은 풀비등을 현저히 촉진시킨다. 이는 다공판이 기포를 비등표면 위에 넓게 퍼뜨려 기포와 비등표면 사이 액막의 면적을 증가시키기 때문이다.
- (2) 높은 열유속에서는 다공도가 클수록, 낮은 열유속에서는 다공도가 작을수록 비등이 촉진되었다. 본 연구에서는 구멍 직경 2.0 mm, 구멍 간격 2.5 mm × 5.0 mm 또는 5.0 mm × 5.0 mm, 비등 표면과의 간격 0.5 mm에서 최적 형상이 얻어졌고 이 형상의 열전달계수는 상용 GEWA-T의 값에 근접한다.
- (3) R-123에서의 최적 다공도는 물이나 에탄올에서 보다 현저히 크다. 이는 R-123의 액체와 기체의 밀도비가 크고 증발잠열은 작기 때문이다.
- (4) 다공판의 비등이력은 평판보다 작다.

참고문헌

(References)

- (1) Webb, R. L. and Kim, N.-H., 2005, "Principles of Enhanced Heat Transfer," Taylor and Francis Pub.
- (2) Thome, J. R., 1990, "Enhanced Boiling Heat Transfer," Hemisphere Pub. Co.
- (3) Collier, J. G. and Thome, J. R., 1996, "Convective Boiling and Condensation," Oxford University Press.

- (4) Nakayama, W., Daikoku, T. and Nakajima, T., 1982, "Effects of Pore Diameters and System Pressure on Saturated Pool Nucleate Boiling Heat Transfer from Porous Surfaces," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 286~291.
- (5) Chien, L.-H. and Webb, R. L., 1998, "A Parametric Study of Nucleate Boiling on Structured Surfaces, Part I: Effects of Tunnel Dimensions," *J. Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 1042~1048.
- (6) Chien, L.-H. and Webb, R. L., 1998, "A Parametric Study of Nucleate Boiling on Structured Surfaces, Part II: Effect of Pore Diameter and Pore Pitch," *J. Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 1049~1054.
- (7) Kim, N.-H. and Choi, K.-K., 2001, "Nucleate Pool Boiling on Structured Enhanced Tubes Having Pores and Connecting Gaps," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 44, pp. 17~28.
- (8) Fan, C.-F. and Yang, C.-Y., 2006, "Pool Boiling of Refrigerants R-134a and R-404A on Porous and Structured Tubes, Part I. Visualization of Bubble Dynamics," *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 13, No. 1, pp. 65~83.
- (9) Mitrovic, J. and Ustinov, A., 2006, "Nucleate Boiling Heat Transfer on a Tube Provided with a Novel Microstructure," *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 13, No. 3, pp. 261~278.
- (10) Kim, D.-E., Yu, D.-I., Jerng, D.-W., Kim, M. H. and Ahn, H.-S., 2015, "Review of Boiling Heat Transfer Enhancement on Micro/nanostructured Surfaces," *Exp. Thermal Fluid Sci.*, Vol. 66, pp. 173~196.
- (11) Enshen, L., Xin, M. and Chen, Y., 1988, "Pool Boiling Heat Transfer on a ST-PTRB Tube," *Advances in Phase Change Heat Transfer*, Xin, M., editor, Chongqing, China, pp. 90~97.
- (12) 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.
- (13) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "The Description of Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~9.
- (14) Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1980, "Heat Transfer Correlations for Natural Convection Boiling," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 23, pp. 73~87.