

<논 문>

천공판의 풀비등 열전달 촉진에 대한 연구

김 내 현*

(1995년 7월 26일 접수)

Pool Boiling Heat Transfer Enhancement by Perforated Plates

Nae-Hyun Kim

Key Words : Perforated Plate(천공판), Pool Boiling(풀비등), Heat Transfer Enhancement(열촉진)

Abstract

Several recent studies have revealed that boiling heat transfer may be considerably enhanced in a narrow restricted region. In this study, the narrow restricted region was formed by attaching a perforated plate on top of a boiling surface. Through systematic experiments, effects of the hole size, hole pattern, gap width between the perforated plate and the boiling surface were investigated using water or R-113. Results show that perforated plates considerably enhance the boiling of water or R-113. For water, especially, they have outperformed commercial enhanced tubes, which confirms that boiling enhancement mechanism of the perforated plate (thin film evaporation beneath the elongated bubble) is very effective to the boiling of high surface tension liquids such as water. Optimum configuration was found - 3.0 mm hole diameter, 15 mm × 15 mm hole pattern, 0.3~0.5mm gap width for water, and 2.0 mm hole diameter, 3.5 mm × 3.5 mm hole pattern, 0.5 mm gap width for R-113. A correlation which correlates most of the data within ±30% was also developed.

기 호 설 명

C_p : 비열
 d : 구멍 직경
 e : 다공도
 h : 열전달계수
 h_{fg} : 증발잠열
 k : 열전도도
 M_i : 점성력과 표면장력에 관련된 무차원수
 Nu : Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 q : 열유속
 s : 구멍 간격
 SH : 과열도에 관련된 무차원수

그리스문자

δ : 천공판과 비등표면의 간격
 ΔT : 벽면과열도
 μ : 동점성계수
 ρ : 밀도
 σ : 표면장력

하첨자

l : 액체
 v : 기체

1. 서 론

*회원, 인천대학교 기계공학과

전달 형식으로 전열 성능이 매우 뛰어나다. 비등시 전열 성능이 뛰어난 이유는 기포가 발생할 때 증발 잠열을 이용하고 표면 이탈시 주위의 유체에 격렬한 유동을 일으키기 때문으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 비등을 촉진시키기 위해서는 기포의 발생을 조장하고 안정화시켜야 하는데 이는 전열표면에 인위적으로 작은 재돌입 공동(reentrant cavity)을 형성해 줌으로써 가능하다.^(2~4) 재돌입 공동이란 공동의 입구에서 안 쪽으로 갈수록 구멍이 점점 넓어지는 형상의 공동으로 적심성(wettability)이 적은 CFC 계 냉매 등의 비등을 촉진시키기 위해서는 필수적인 조건이 된다. 비등을 촉진시키기 위한 연구는 지난 수십년간 지속적으로 수행되어 왔고 그 결과 상용 비등 전열관도 다수 존재한다. 상용 촉진관으로는 평판을 성형하여 비등 표면을 재돌입 공동의 형상으로 만든 성형 전열관과 비등 표면에 작은 금속 입자를 소결한 다공층관이 주로 사용되고 있다.^(5~7) 이들 상용 촉진표면의 형상은 Fig. 1에 보여진다. 상용 촉진관의 비등 성능은 평판에 비하여 월등하게 나아지지만 제작이 까다로우며 가격이 비싸고 또 특히 때문에 국내에서는 개발에 제약이 따르기도 한다.

최근들어 좁은 제한된 공간(narrow restricted region)에서 비등이 현저히 촉진된다는 연구 결과가 보고되었다.^(8,9) 좁은 공간에서 형성된 기포는 자유로이 이탈하지 못하고 좁은 공간내에 넓게 퍼

지게 되는데, 이때 기포 하부와 비등 표면 사이에 얇은 액막이 형성되고 이 액막은 주위의 열을 흡수하여 증발하며 열전달을 촉진한다. 이러한 비등 촉진 현상을 이용한 전열촉진관에 대한 연구는 해외 여러 나라에서 심도 있게 진행되고 있는데 특히 구주 연합(EC)에서는 JOULE 1 project를 통하여 다양한 촉진 형상에 대한 연구를 수행하고 있다.⁽¹⁰⁾

Fig. 2는 Enshen 등⁽¹¹⁾이 실험한 천공관(perforated tube)의 스케치이다. 천공관 내측에는 직경이 약간 작은 히터가 삽입되어 있다. 내측의 히터 표면에서 발생한 기포가 외측 천공관에 도달하면 기포는 더 이상 위로 성장하지 못하고 평판과 천공관 사이로 커지게 된다. 그러다가 구멍을 만나게 되면 기포의 일부는 빠져나가게 되고 인접 구멍으로 외부 액체가 유입된다. 기포 하부와 벽면 사이는 액체와 벽면과의 흡착력에 의하여 얇은 액체막이 형성되는데 이막은 매우 얇고 막이 차지하는 면적은 넓으므로 열전달률은 매우 크다. Enshen 등은 물과 에탄올에 대하여 실험하였는데 열전달 계수는 물의 경우 구멍의 직경 1.2 mm, 구멍 간격 14 mm, 천공관과 벽면의 간격 0.5 mm에서, 에탄올의 경우는 직경 2.0 mm, 구멍 간격 14 mm, 천공관과 벽면의 간격 0.5 mm에서 최대가 되었다. 또한 그 값은 상용 촉진관의 열전달계수와 비교할만 하였다.

Enshen 등은 비교적 직경이 큰 (1 mm~2 mm)

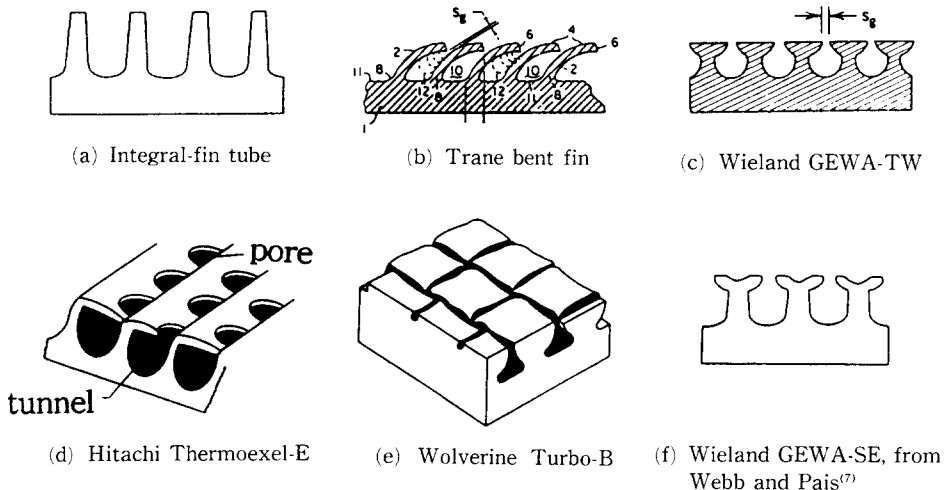


Fig. 1 Commercial enhanced boiling surfaces

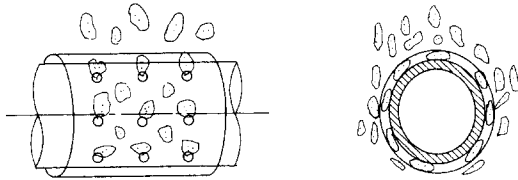


Fig. 2 Sketch of boiling in a perforated tube ⁽¹¹⁾

볼트로 체결하여 구성하고 동판과 동플랜지 사이에는 O-ring을 설치하여 기밀을 유지하였다. 동판의 중앙에 뚫린 직경 60 cm 구멍에는 히팅 블록이 설치되는데 히팅 블록과 동판 사이도 O-ring으로 기밀을 유지하였다. 유리 플라스크의 상부에는 응축 구멍을 사용한 반면 Nakayama 등^(12,13)은 직경이 0.1 mm 정도의 미세한 구멍의 천공판을 사용하여 실험을 수행하였다. 그들이 사용한 축진 표면의 형상은 Fig. 1(d)에 보여진다. 이 표면은 Fig. 1(a)에 보여진 핀의 선단부를 커터(cutter)로 톱니 모양으로 깎아낸 후 절곡하여 만들어지는데 최종적으로는 터널과 터널 상부에 천공판이 부착된 형상이 된다. Nakayama 등은 일련의 실험을 통하여 R-11의 경우 구멍 직경 0.15 mm에서 최대 열전달 계수를 얻었다. 그들은 물과 질소에 대해서도 실험을 수행하였는데 물의 경우 0.08 mm가, 질소의 경우는 0.12 mm가 최적 구멍 크기로 나타났다.

본 연구에서는 비교적 큰 구멍 직경 (1.2 mm ~ 5.0 mm)의 천공판(perforated plate)을 평판 위에 설치하여 비등 실험을 수행하였다. 평판은 평판과는 다른 기본적인 기하학적 형상으로 비등 축진이 요구되는 전자 칩 등은 평판 형상을 하고 있다. 매체로는 물과 R-113을 사용하였다. R-113은 대기압에서 비등점이 47.6°C로 상온에서 액체상태로 존재하므로 취급이 용이하고 또한 여타 냉매와 물성치가 유사하여 냉매 실험에 많이 사용되어 왔다. R-113은 물이나 에탄올보다 표면장력이 작고 적실성이 커서 비등을 촉진하기가 용이하지 않은 면이 있다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 3은 실험 장치의 개략도를 보여준다. 실험 장치는 크게 시험부와 응축기 그리고 히팅 블록으로 구성된다. 시험부는 직경 280 mm, 두께 5 mm의 동판 위에 유리 플라스크가 부착된 동플랜지를

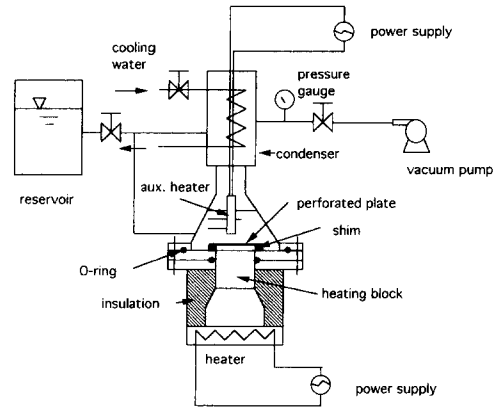


Fig. 3 Schematic drawing of the pool boiling apparatus

기를 설치하였는데 시험부에서 증발한 증기는 응축기에서 응축하여 다시 시험부로 되돌아 간다. 응축 수로는 수도물을 사용하였다. 히팅 블록의 하부에는 용량 1.5 KW의 복사 히터를 설치하여 시험부에 열량을 공급하였다. 히팅 블록의 밑바닥은 방사율을 높이기 위하여 그을음 처리를 하였다. 또한 외부로의 열손실을 막기 위하여 히팅 블록의 측면을 석면으로 단열하였다. 시험부 내에는 보조 히터를 설치하여 낮은 열유속에서도 포화 온도를 유지하도록 하였다.

Fig. 4는 히팅 블록의 상세도를 보여준다. 히팅 블록은 직경 190 mm의 알루미늄 봉을 가공하여 제작하였다. 시험부의 열유속과 비등 표면 온도는 표면으로부터 10 mm와 20 mm 하부에 원주 방향으로 네 곳씩 설치된 열전대로부터 구하였다. 열전대는 히팅블록에 반경방향으로 직경 1.4 mm, 길이 20 mm의 구멍을 가공하여 설치하였고 각 위치에서의 온도는 원주방향 네 온도의 평균값을 사용하였다. 열유속은 축방향 온도의 기울기로부터 구하였고 표면온도는 축방향 온도를 외삽하여 구하였다. 열전대로는 테프론 코팅된 직경 0.3 mm의 구리-콘스탄탄을 사용하였다. 포화액의 온도는 열전대를 비등 표면으로부터 5 cm와 10 cm 상부 두 곳에 설치하여 측정하였는데 실험 중 두 곳의 온도는 거의 일치하였다. 시험부의 압력은 부르돈식 압력계로 측정하였고 이 압력에 상응하는 포화온도와 측정된 포화액의 온도를 비교한 결과 두 값은 0.2°C 이내에서 일치하였다. 따라서 실험중 불응축 가스의 영향은 무시할만하다고 판단된다. 본 실험은 대기압

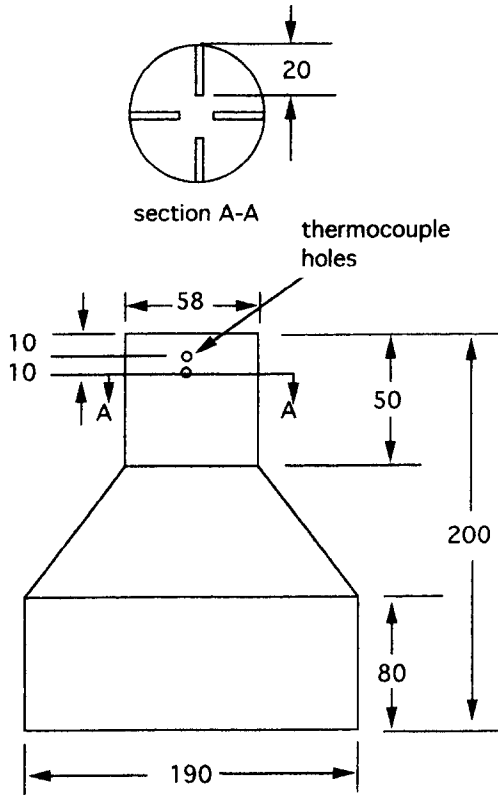


Fig. 4 Schematic details of the heating block

에서 수행되었다.

천공판은 두께 0.5 mm의 동판을 드릴로 구멍 가공하여 제작하였다. Fig. 5에 천공판의 스케치가 보여진다. 천공판은 구멍 크기와 배열로써 특징지어진다. 또한 다공도로도 나타낼 수가 있는데 다공도란 천공판의 면적 중 구멍이 차지하는 면적비를 나타낸다. 예를들어 구멍 크기 2.0 mm, 구멍 배열 10 mm×10 mm인 천공판의 경우 다공도는 0.03이 된다. 본 연구에서는 비등 표면과 천공판 사이의 간격의 영향도 조사하였다. 천공판과 비등표면인 히팅블럭의 뒷면과의 간격은 Fig. 2에 보여지듯이 일정두께의 환형 shim을 삽입하여 조절하였다.

실험 절차는 다음과 같다. 시험부의 기밀을 확인한 후 진공 펌프를 사용하여 시험부 내의 공기를 제거한다. 진공 상태에서 물 또는 R-113의 작동유체를 약간 주입한 후 다시 1~2분간 진공 펌프를 작동한다. 이런 절차를 수차례 반복하여 시험부내의 공기를 완전히 제거한 다음 작동유체를 주입한다. 작동유체의 수위는 비등 표면위 15 cm를 유지

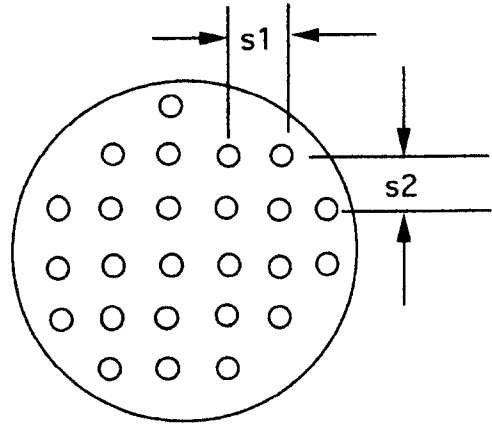


Fig. 5 Hole configuration ($s_1 \times s_2$) of a perforated plate

하도록 하였다. 비등 표면의 표면 처리 기법은 Bergles와 Chyu⁽¹⁴⁾가 제안한 방법을 사용하였는데 이 방법은 다음과 같다. 비등 표면을 열유속 50 kW/m²에서 약 한시간 가량 비등시킨 후 천천히 열유속을 0 kW/m²까지 감소시킨다. 그 후 보조 히터를 사용하여 약 30분간 작동유체를 비등시킨다. 이와 같이 하여 비등 표면과 작동유체에 잔류해 있을 가스들을 제거하였다. 실험은 열유속을 조금씩 변화시켜가며 수행하였고 온도는 열유속을 변화시킨 후 약 30분 후에 측정하였다. 낮은 열유속에서는 보조 히터를 사용하여 포화온도를 유지하였고 온도 측정시 보조 히터는 켜지 않았다. 비등 표면은 매번 실험전 가는 사포(CW 800)로 사포질한 후 아세톤으로 닦아내었다.

실험의 불확실도에 대한 해석을 Kline과 McClintock⁽¹⁵⁾이 제안한 방법에 따라 수행하였다. 비등 실험의 불확실도는 시편 가공의 불확실도와 온도 측정의 불확실도로 나누어 생각할 수 있는데 시편 가공의 불확실도는 약 5% 정도되고 온도 측정의 불확실도는 100 kW/m² 정도의 높은 열유속에서는 약 5%, 5 kW/m²의 낮은 열유속에서는 약 15% 정도 된다. 따라서 비등 열전달 계수의 불확실도는 높은 열유속에서는 약 7%, 낮은 열유속에서는 약 16% 가량된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 비등 이력(boiling hysteresis) 현상

R-113과 같이 표면장력이 작은 유체의 경우 낮

은 열유속에서는 열유속을 증가시키며 측정된 비등 곡선과 감소시키며 측정된 곡선은 일치하지 않고 증가시키며 측정된 곡선의 벽면과열도가 더 크다. 그러다가 특정 열유속 이상에서는 순간적으로 벽면과열도가 감소하여 두 곡선이 일치하는 현상을 보이는데 이를 비등이력현상이라 한다. 비등이력현상은 비등 개시 후 기포가 전 표면에서 동시에 발생하지 않고 표면의 일부에서 먼저 발생하고 일정 열유속 이상이 되었을 때 기포가 순간적으로 전체 표면으로 전파되기 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 이러한 비등이력은 증발기나 액침 전자칩 등의 초기 작동시 과도한 표면온도 상승을 유발할 수 있으므로 비등이력에 의한 온도차(boiling hysteresis excursion)가 적은 것이 바람직하다.

Fig. 6에 R-113에서 평판과 구멍 직경 2.0 mm, 3.5 mm×3.5 mm 배열의 천공판에 대한 실험 결과가 보여진다. 천공판과 비등 표면과의 간격은 0.5 mm이었다. 본 연구에서는 비등 실험자료를 관례에 따라 x축에 벽면과열도, y축에 열유속의 형태로 나타내었다. 비등표면의 열적성능을 나타내는 열전달계수는 열유속을 벽면과열도로 나눈 값이므로 본 그래프에서는 비등곡선이 왼쪽으로 치우칠수록 열전달계수가 큰 경우이다. Fig. 6의 범례 (legend)에는 천공판의 형상을 기호로 표시하였는데 예를 들어 d2-3.5×3.5-0.5는 구멍 직경 2.0 mm, 구멍 배열 3.5 mm×3.5 mm 천공판을 비등 표면과의 간격 0.5 mm로 설치한 것을 의미한다. 실험은 열유속을 증가하면서 수행하고 최고 열유속에 다다른 후에는 감소시키면서 수행하였다. Fig. 6은 천공판의 비등 이력이 크지 않음을 보여준다. 평판의 경우 비등이력 온도차는 4K 정도임

에 반하여 천공판의 경우는 2K 정도이다. 이는 천공판이 비등 표면으로부터 기포의 이탈을 억제하고 그 기포들을 전 표면으로 전파시키는 역할을 하기 때문으로 판단된다. 참고로 표면에 작은 입자를 소결시켜 제작되는 상용 High Flux 관의 비등이력 온도차는 7K 정도이고⁽¹⁴⁾ 관외측을 T형상으로 성형한 GEWA-T 관의 비등이력 온도차는 3K 정도이다.⁽¹⁶⁾ Fig. 6은 천공판이 비등 열전달을 현저히 촉진시킴을 보여준다. 열유속이 증가할수록 촉진율은 감소하는데 이는 높은 열유속에서는 천공판의 제한된 구멍으로 많은 기포가 효과적으로 빠져나가지 못하기 때문으로 판단된다. Fig. 6에는 Stephan과 Abdelsalam⁽¹⁷⁾의 상관식도 나타나 있는데 평판 실험 자료와 잘 일치함을 보여준다.

3.2 구멍 크기의 영향

물의 경우 : Fig. 7은 물에서 구멍 크기를 2.0 mm에서 5.0 mm까지 변화시키면서 실험한 결과를 보여준다. 실험은 열유속을 감소시키면서 수행되었다. 구멍 배열은 15 mm×15 mm이고 천공판과 비등표면의 간격은 0.5 mm이었다. 이들 구멍배열과 간격은 이들을 변화시키면서 실험한 결과 중 최적형상이다. Fig. 7에는 평판의 실험자료도 보이는데 이들은 Stephan과 Abdelsalam⁽¹⁷⁾의 상관식과 잘 일치한다. Fig. 7은 천공판이 비등을 현저히 촉진시킴을 보여주는데 최대 열전달계수는 직경 3.0 mm의 천공판에서 나타나고 구멍 크기가 이보다 작거나 크면 열전달계수가 감소한다. 천공판이 열전달을 촉진하려면 기포가 비등표면 위에 되도록이면 넓게 퍼져 기포와 비등표면 사이의 액막이 넓게 존재하고 생성된 기포가 천공판의 구멍을 통하여

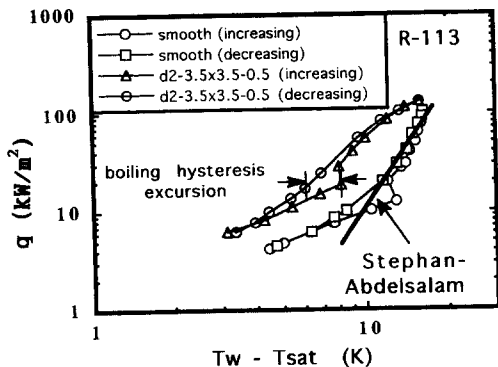


Fig. 6 Curves showing boiling hysteresis in R-113

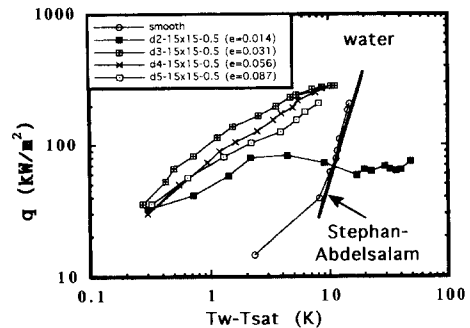


Fig. 7 Water boiling curves showing the effect of hole size

적절히 배출되어야 한다. 천공판의 구멍이 너무 작으면 기포가 적절히 배출되지 않고 액체유입이 원활치 못해 액막이 말라버리는 드라이아웃(dry-out) 현상이 나타나리라 예상되는데 Fig. 7은 직경 2.0 mm의 천공판에서 비교적 낮은 열유속 (70~80 kW/m²)에서 드라이아웃 현상이 나타남을 보여준다. 또한 천공판의 구멍이 너무 크면 기포가 넓게 퍼질 틈이 없이 바로 배출되므로 열전달 계수가 감소하게 된다. Fig. 7은 구멍 직경이 4.0 mm 이상에서 열전달계수가 감소함을 보여준다. Fig. 7의 범례 중의 'e'는 천공판의 다공도를 나타낸다.

R-113의 경우 : Fig. 8은 R-113에서 구멍 크기를 1.2 mm에서 4.0 mm까지 변화시키며 실험한 결과를 보여준다. 구멍 배열은 10 mm×10 mm, 천공판과 비등표면의 간격은 0.5 mm이다. 실험은 열유속을 감소시켜가며 수행되었다. Fig. 8은 천공판의 비등곡선이 서로 교차함을 보여주는데 15 kW/m²을 기준으로 그보다 낮은 열유속에서는 구멍이 작을수록 15 kW/m² 이상에서는 구멍이 클수록 열전달 계수가 커짐을 보여준다. 이 이유로 기포생성량과 구멍 크기와의 관계를 고려하면 다음과 같이 설명될 수 있을 것이다. 낮은 열유속에서는 구멍이 너무 크면 기포가 천공판과 비등표면 사이에서 퍼질 틈이 없이 구멍 밖으로 빠져나가게 되고 높은 열유속에서는 구멍이 너무 작으면 기포가 적절히 빠져나오지 못하므로 열전달 계수가 감소하게 된다. 따라서 낮은 열유속에서는 구멍이 작을수록, 높은 열유속에서는 구멍이 클수록 바람직하다. 일반적으로 냉동기의 운전 열유속은 20~30 kW/m²인데 Fig. 8은 이 열유속에서 구멍 직경 2.0 mm의 천공

판이 가장 촉진 효과가 좋음을 보여준다. 또한 Fig. 8은 높은 열유속에서 드라이아웃 현상이 나타남을 보여주는데 구멍 크기가 커질수록 드라이아웃 열유속은 증가함을 보여준다.

3.3 구멍 배열의 영향

물의 경우 : 구멍 크기가 같을 경우 구멍 수가 많아지면 기포의 배출이 용이하므로 높은 열유속에서 열전달 계수가 증가하리라 예측된다. Fig. 9는 물에서 구멍 크기 3.0 mm, 천공판과 비등표면의 간격 0.5 mm인 천공판의 구멍 배열에 따른 비등곡선의 변화를 보여준다. Fig. 9는 낮은 열유속에서는 구멍 수가 감소할수록(구멍 배열 간격이 커질수록) 높은 열유속에서는 구멍 수가 증가할수록 열전달 계수가 증가함을 보여준다. 또한 Fig. 9는 10 mm×10 mm의 경우 200 kW/m²의 높은 열유속에서 열유속이 증가하였는데도 벽면과열도는 감소하는 다소 비정상적인 경향을 보인다. 이는 이 열유속에서 급격히 열전달계수가 증가함을 의미하는데

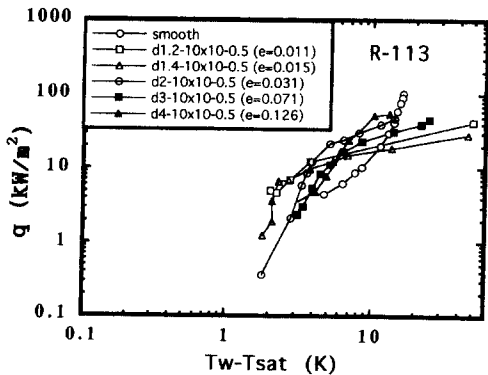


Fig. 8 R-113 boiling curves showing the effect of hole size

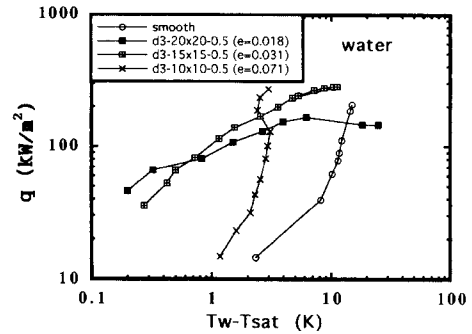


Fig. 9 Water boiling curves showing the effect of hole configuration

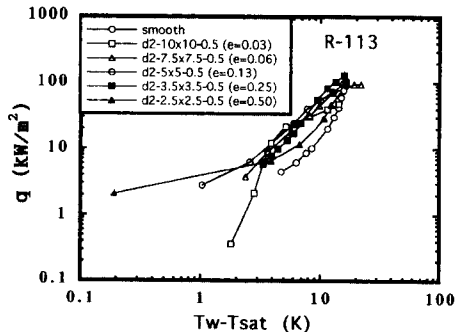


Fig. 10 R-113 boiling curves showing the effect of hole configuration

Enshen 등⁽¹¹⁾도 천공판에 대한 실험에서 이와같은 현상을 예측하였다.

R-113의 경우 : Fig. 10은 R-113에서 구멍 크기 2.0 mm인 천공판의 구멍 수에 따른 비등 곡선의 변화를 보여준다. 천공판과 비등표면의 간격은 0.5 mm이었다. Fig. 10은 높은 열유속에서 구멍 수가 증가할수록 열전달 계수가 증가함을 보여준다. 그러나 구멍 수가 너무 많아지면(2.5 mm×2.5 mm의 경우) 열전달 계수는 급격히 감소하여 평판과 유사하게 된다. Fig. 10은 또한 10 kW/m² 이하의 낮은 열유속에서 열전달 계수가 평판에 비하여 상당히 큼을 보여준다. 비등 곡선의 형상은 이 영역이 자연 대류 영역임을 암시하는 데 천공판이 자연대류도 현저히 증진시킴을 보여준다.

3.4 천공판과 비등 표면 간격의 영향

물의 경우 : Fig. 11에 물에서 천공판과 비등표면 간격을 변화시켜가며 실험한 결과가 나타나 있다. 천공판의 구멍 직경은 3.0 mm, 구멍 배열은 15 mm×15 mm이었다. Fig. 11은 간격이 줄어들수록 열전달 계수가 증가함을 보여주는데 0.3 mm와 0.5 mm는 거의 같은 값을 보여준다. 간격이 더욱 작아져 비등표면과 접하게 되면 열전달 계수는 감소하여 평판의 값에 접근하리라 예상되는데 본 연구에서는 실험상의 어려움으로 간격을 0.3 mm까지밖에 변화시킬 수 없었다.

R-113 : Fig. 12에 R-113에 대한 실험 결과가 나타나 있다. 천공판의 구멍 직경은 2.0 mm, 구멍 배열은 3.5 mm×3.5 mm이었다. Fig. 12는 간격 0.5 mm에서 열전달 계수가 가장 큼을 보여준다.

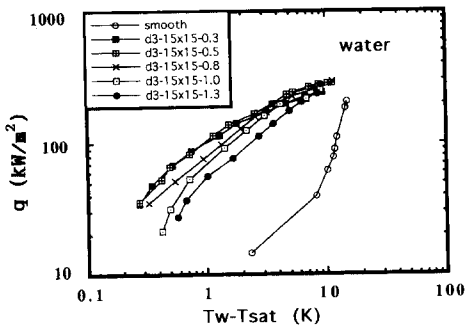


Fig. 11 Water boiling curves showing the effect of gap width between perforated plate and heating wall

3.5 다공도의 영향

다공도(e)는 구멍 크기(d)와 구멍 배열(s)이 주어지면 $e = \pi d^2 / 4s^2$ 로 계산되고 같은 다공도에서 구멍 크기는 배열에 따라 달라진다. 본 절에서는 다공도가 같은 천공판에서 구멍 크기와 배열이 열전달계수에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. Fig. 13에는 다공도가 0.014이고 구멍 크기가 2 mm인 경우 (구멍 배열 15 mm×15 mm)와 다공도가 0.018이고 구멍 크기가 3 mm인 경우 (구멍 배열 20 mm×20 mm)의 열전달계수가 보여진다. 비등 매체는 물이다. 두 경우 다공도는 거의 같은데 구멍 크기 3 mm에서 열전달계수가 월등히 높음을 보여준다. 또한 다공도가 0.056 ($d=4$ mm), 0.071 ($d=3$ mm), 0.087 ($d=5$ mm)인 경우가 비교되어 있는데 0.056과 0.087은 열전달계수가 유사한 반면 0.071은 전혀 다른 형태의 비등곡선을 보여준다. 다공도 0.056과 0.087의 구멍 배열은 15 mm×15

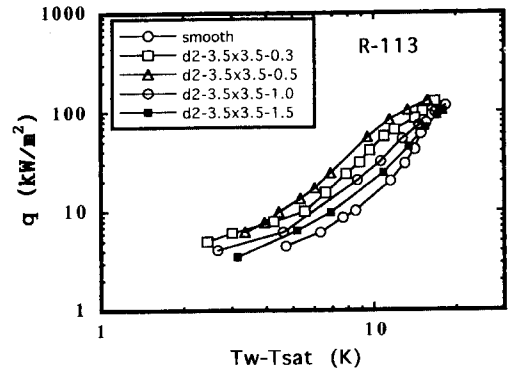


Fig. 12 R-113 boiling curves showing the effect of gap width between perforated plate and heating wall

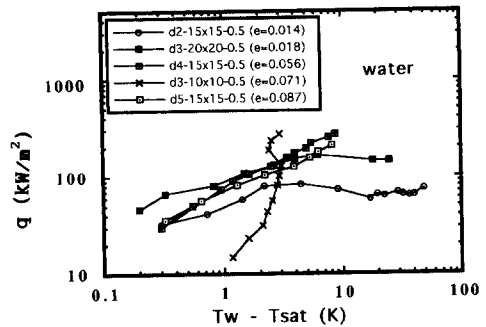


Fig. 13 Water boiling curve showing the effect of porosity

mm이고 0.071의 구멍 배열은 10 mm×10 mm이다. 이들로부터 같은 다공도라도 구멍 크기와 배열이 다르면 전혀 다른 형태의 비등 곡선이 형성됨을 알 수 있다.

3.6 여러 작동유체의 최적형상 비교

본 연구의 결과 물의 경우 최적 형상은 구멍 직경 3.0 mm, 구멍 배열 15 mm×15 mm이었고 R-113의 경우는 구멍 직경 2.0 mm, 구멍 배열 3.5 mm x 3.5 mm이었다. Enshen 등⁽¹¹⁾은 물과 에탄올에 대한 실험을 통하여 물의 경우 구멍 직경 1.2 mm, 구멍 배열 14 mm×14 mm 에탄올의 경우 구멍 직경 2.0 mm, 구멍 배열 14 mm×14 mm 에서 열전달계수가 최대로 됨을 보여주었다. 모든 경우에 비등표면과의 간격은 0.5 mm이었다. 물의 경우 본 연구의 결과와 Enshen 등의 결과가 최적 구멍 크기에서 다소 상이한데 이는 시험부의 형상이 다르기 때문으로 판단된다. 본 연구의 경우는 시험부의 형상이 평판으로 중력이 판 전체에 균일하게 작용하는 반면 Enshen 등의 경우는 원판으로 중력의 영향이 원주방향의 위치에 따라 다르게 된다. 중력은 기포의 생성 및 이탈에 큰 영향을 미친다. 최적 형상에서 다공도를 구해보면 평판의 경우는 물은 0.03, R-113은 0.32, 원판의 경우는 물은 0.006, 에탄올은 0.02이다. 비등 열전달에 영향을 미치는 인자로는 액체와 기체의 밀도, 증발 잠열, 표면 장력과 점축각 등 여러 인자가 있을 수 있다. 그 중 증발 잠열은 기체발생량과 직접적으로 관계가 있는 인자인데 증발잠열이 클수록 같은 열유속에서 기체발생량이 작아 다공도가 작은 판이 유리하리라 예측된다. 물의 경우 대기압에서 증발잠열은 2257kJ/kg이고 에탄올은 963kJ/kg 그리고 R-113은 144kJ/kg이다. 따라서 증발잠열이 최적다공도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3.7 여타 비등 촉진 표면과 성능 비교

Fig. 14에 물에 대한 본 실험 결과를 Nakayama 등^(12,13)의 실험 자료와 비교하였다. Nakayama 등이 실험한 형상은 Fig. 1 d에 보여지듯이 터널 상부에 미세한 구멍 크기의 천공관이 부착된 형상으로 Fig. 14에는 구멍 직경 0.08 mm의 실험자료가 나타나 있다. Nakayama 등은 구멍 직경 0.08 mm에서 최대 열전달계수를 얻었다. Fig. 14는 Nakayama 등의 촉진 표면이 본 실험의 천공판

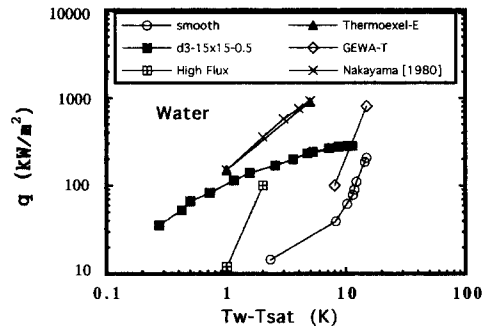


Fig. 14 Water boiling performance of the perforated plate (d3-15×15-0.5) compared with enhanced surfaces

보다 열전달 계수가 높음을 보여준다. Nakayama 등의 천공관은 터널 벽을 통하여 전열 표면과 연결되어 있고 본 실험의 천공관은 하부의 전열 표면과 분리되어 있다. 따라서 Nakayama 등의 경우 터널 벽과 천공관 모두 비등표면으로 작용하는데 반하여 본 연구에서는 기본 비등 표면만이 존재하므로 열전달계수가 다소 낮지 않나 생각된다. 또한 구멍 직경에 있어서도 Nakayama 등은 미세한 구멍을 사용한 반면 본 연구에서는 비교적 큰 구멍을 사용하였는데 이에 대해서는 좀 더 연구가 필요하다고 판단된다. Fig. 14에는 상용 비등 촉진관의 열전달계수도 나타나 있다. 상용 촉진관은 원판이고 본 연구는 평판에서 수행되었으므로 정확한 비교는 안되지만 개략적인 경향은 판단할 수 있을 것이다. 비교된 상용 촉진관으로는 비등표면에 작은 금속을 소결한 High Flux⁽¹⁴⁾, 비등 표면을 성형가공하여 미세한 공동을 형성한 Thermoexel-E^(12,18) 그리고 비등 표면을 T형으로 성형한 GEWA-T^(16,19)이다. Thermoexel-E는 Nakayama 등의 연구를 토대로 개발된 판이므로 두 비등곡선은 일치함을 보인다. Fig. 14는 천공판 부착 표면이 기존 상용 촉진관들과 비교할 만하고 낮은 열유속에서는 오히려 성능이 우월함을 보여준다. 천공관의 전열촉진 기구 (heat transfer enhancement mechanism)는 기존 상용 촉진관과는 달리 이탈이 억제된 기포와 비등표면 사이의 액막의 증발에 의한 것인데 이러한 기구가 표면장력이 큰 물과 같은 유체의 비등에는 매우 효과적임을 보여준다.

Fig. 15에는 R-113에 대한 비교 결과가 나타나 있는데 천공판 부착표면은 GEWA-T와 유사한 열적성능을 보인다. High Flux와 Thermoexel-E는

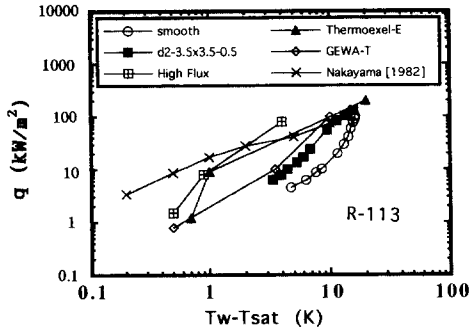


Fig. 15 R-113 boiling performance of the perforated plate (d2-3.5×3.5-0.5) compared with enhanced surfaces

표면에 작은 금속을 소결하거나 성형하여 미세한 공동을 형성한 관들인데 이러한 미세한 공동은 핵 활성화소를 증가시키고 기포형성의 안정화에 기여하여, 표면장력이 작은 R-113과 같은 유체의 비등을 현저히 촉진시키는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 하지만 이러한 표면들의 비등이력 온도차는 7~8 K로 매우 크므로 이러한 표면들로 제작된 증발기의 경우 초기작동시 주의를 요한다. 반면에 GEWA-T나 천공판 부착표면은 2~3 K 정도의 작은 비등이력 온도차를 보인다. Fig. 15에 보여진 Nakayama 등의 자료는 천공 구멍 직경 0.15 mm인 비등 표면을 R-11에 대하여 실험한 결과이다.

3.8 상관식 개발

본 연구의 실험자료로부터 천공판 비등상관식을 개발하였다. 전체 실험자료 중 자연대류나 드라이아웃 영역의 자료는 제외하고 핵비등 영역의 자료만을 고려하였다. 천공판의 비등에 관련된 주된 인자로는 열유속 q , 벽면과열도 ΔT , 증발잠열 h_{fg} , 액체의 비열 C_{pl} , 액체의 열전도도 k_l , 액체의 동점성계수 μ_l , 액체의 표면장력 σ , 액체의 밀도 ρ_l , 기체의 밀도 ρ_v , 구멍 직경 d , 구멍 간격 s , 비등 표면과의 간격 δ 인데 차원해석을 통하여 아래와 같은 무차원 수들을 찾아내었다.

$$Nu = f(M_i, e, s/\delta, SH, Pr_l)$$

$$Nu = \frac{qs}{k_l \Delta T} = \frac{hs}{k_l}$$

$$M_i = \frac{\mu_l q}{\rho_v \sigma h_{fg}}, SH = \frac{c_{pl} \Delta T}{h_{fg}}$$

여기서 Nu 는 Nusselt 수, M_i 는 기포에 작용하는

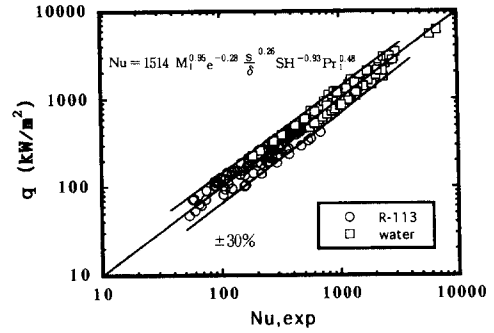


Fig. 16 Perforated plate pool boiling correlation compared with experimental data of this study

점성력과 표면장력에 관련된 무차원수, e 는 다공도, SH 는 벽면 과열도에 관련된 무차원수, Pr_l 은 액체 Prandtl 수이다. 본 실험자료를 상기 무차원수들로 회귀분석하여 식 (1)을 구하였다.

$$Nu = 1514 M_i^{0.95} e^{-0.28 \frac{s}{d} 0.26} SH^{-0.93} Pr_l^{0.48} \quad (1)$$

$$0.00004 \leq M_i \leq 0.05, 0.01 \leq 0.5$$

$$0.0005 \leq SH \leq 0.17, 1.7 \leq Pr_l \leq 7.0$$

$$2.4 \leq s/\delta \leq 20.0$$

Fig. 16에 실험자료와 상관식이 비교되어 있는데 상관식은 대부분의 자료를 $\pm 30\%$ 이내에서 예측함을 보여준다. 상기 상관식을 사용하면 증발기의 운전조건 (M_i, SH)이 주어졌을 때 최적 천공 형상(e 또는 s/δ)을 구해낼 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 천공판을 비등 표면 위에 설치하여 풀비등을 촉진시키는 방안을 모색하였다. 물과 R-113을 비등액으로 사용하였고 주요 연구 결과는 아래와 같다.

① 천공판은 풀비등을 현저히 촉진시킨다. 특히 물의 경우 촉진율은 상용촉진판보다 나았는데 이로부터 천공판의 촉진기구(이탈이 억제된 기포와 비등표면 사이의 액막의 증발에 의한 전열촉진)가 물과 같은 표면장력이 큰 유체의 비등에는 매우 효과적임을 알 수 있다.

② 최적 촉진 형상은 물의 경우 구멍 직경 3.0 mm, 구멍 배열 15 mm×15 mm, 비등표면과의 간격 0.3~0.5 mm이고 R-113의 경우는 구멍 직경

2.0 mm, 구멍 배열 3.5 mm×3.5 mm 비등표면과의 간격 0.5 mm이다.

③ 본 연구의 실험자료는 아래의 식으로 상관된다.

$$Nu = 1514 M_i^{0.95} e^{-0.28 \frac{S}{\delta}} S^{0.26} SH^{-0.93} Pr_i^{0.48}$$

참고문헌

- (1) Rohsenow, W. M., 1973, "Boiling," in *Handbook of Heat Transfer*, eds. Rohsenow W. M. and Hartnett, J. P., New York, McGraw-Hill, chap. 13.
- (2) Griffith, P. and Wallis, J. D., 1960, "The Role of Surface Conditions in Nucleate Boiling," *Chem. Eng. Progr. Symp. Ser.* Vol. 56, pp. 49~63.
- (3) Webb, R. L., 1981, "The Evolution of Enhanced Surface Geometries for Nucleate Boiling," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 2 Nos. 3~4, pp. 46~49.
- (4) Webb, R. L., 1983, "Nucleate Boiling on Porous Coated Surfaces," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 4, Nos. 3~4, pp. 71~81.
- (5) Thome, J. R., 1990, *Enhanced Boiling Heat Transfer*, Hemisphere Pub. Co.
- (6) Webb, R. L., 1970, "Heat Transfer Surface which Promotes Nucleate Ebullition," U.S. Patent 3,521,708.
- (7) 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 Trans.*, Vol. 35, No. 8, pp. 1893~1904.
- (8) Monde, M. and Mitsutake, M., 1989, "Enhancement of Heat Transfer Due to Bubbles Passing through a Narrow, Vertical, Rectangular Channel," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 5, pp. 803~814.
- (9) Fujita, Y., Ohta, H., Uchida, S. and Nishikawa, K., 1988, "Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in the Narrow Space between Rectangular Surfaces," *Int. J. Heat Mass Trans.* Vol. 31, pp. 229~239.
- (10) Mertz, R., Groll, M., Marvillet, Ch. and Heselgreaves, J. E., 1994, "Enhanced Static Evaporation Heat Transfer Surfaces for Compact Two-phase Heat Exchangers," *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 14, No. 5, pp. 493~506.
- (11) Enshen, L., Xin, M. and Chen, Y., 1988, "Pool Boiling Heat Transfer on a ST-PTRB Tube," *Advances in Phase Change Heat Transfer*, ed. M. Xin, Chongqing, China, pp. 90~97.
- (12) Nakayama, W., Daikoku, T., Kuwahara, H. and Nakajima, T., 1980, "Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces, Part 1: Experimental Investigation," *J. Heat Transfer*, Vol. 102, pp. 445~450.
- (13) Nakayama, W., Daikoku, T. and Nakajima, T., 1982, "Effects of Pore Diameters and System Pressure on Saturated Pool Boiling Heat Transfer from Porous Surfaces," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 286~291.
- (14) 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.
- (15) Kline, S. J. and McCintock, F. A., 1953, "The Description of Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~9.
- (16) Ayub, Z. H. and Bergles, A. E., 1985, "Pool Boiling from GEWA Surfaces in Water and R-113," in *Augmentation of Heat Transfer in Energy Systems*, ed. P. J. Bishop, HTD. Vol. 52, pp. 57~66.
- (17) Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1980, "Heat Transfer Correlations for Natural Convection Boiling," *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 23, pp. 73~87.
- (18) Marto, P. J. and Lepere, J., 1982, "Pool Boiling Heat Transfer from Enhanced Surfaces to Dielectric Fluids," *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 292~299.
- (19) Yilmaz, S. and Westwater, J. W., 1981, "Effect of Commercial Enhanced Surfaces on the Boiling Heat Transfer Curve," in *Advances in Enhanced Heat Transfer*, HTD Vol. 18, pp. 73~91.