

폴비등에서 소형 사각기둥핀 배열형상에 따른 FC-72의 응축특성

강 상 우[†], 김 서 영

한국과학기술연구원 에너지메카닉스센터

Condensing Characteristics of Pin-finned Surfaces on Pool Boiling in FC-72

Sarng Woo Karng[†], Seo Young Kim

Energy Mechanics Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

(Received February 25, 2011; revision received June 9, 2011)

ABSTRACT: As the electronic industry rapidly develops, the heat flux from state-of-the-art electronics increases up to 10^6 W/m². For this reason, the development of a new cooling technology for high heat flux applications is strongly required. Recently, some cooling technologies using boiling and condensation of working fluid are being adopted to overcome such a technical barrier. In the present study, a smooth boiling surface (14×14 mm²) was immersed in FC-72 and its vapor was condensed by four different types of condensation surfaces (30×30 mm² base). The condensing surfaces were composed of a smooth surface and 1×1 mm² pin-finned surfaces of 2 mm height with 0.3, 0.5 and 1 mm array spacing. Boiling and condensing characteristics were investigated in detail on their combinations of boiling and condensing surfaces. For a smooth boiling surface the results obtained showed that the pin-finned condensing surface with 1 mm array spacing yielded the best performance and the smooth condensation surface did the worst. Furthermore hysteresis phenomena could be reduced by using enhanced condensing surfaces.

Key words: Pin-finned surface(사각기둥핀 표면), Wetting characteristics(젖음 특성), Superheat(과열온도), Thermal shock(열적 충격), Array spacing(배열간격), Hysteresis phenomena(이력현상), Hysteresis width(이력 폭)

1. 서 론

최근 전자산업의 획기적인 발달로 인하여 전자장비들은 점점 소형화되는 만큼 전자장비들이 뿜어내는 열유속은 점점 커지고 있다. 이러한 소형 전자장비들은 열에 매우 취약하며 적절히 작동할 수 있는 온도 조건은 85℃ 이하이다. 따라서 전자장비들이 소형화되는 만큼 적절한 온도 상태로 유지시키기 위한 냉각기술은 필수적이다. 이들을 냉각시키기 위한 기술

로는 히트파이프, 액침냉각 등을 이용하는 방법이 있으며, 이들은 모두 비등과 응축을 기본으로 하고 있기 때문에 그 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

그리고 전자장치 냉각에 작동유체로 주로 사용되고 있는 유전성(dielectric) 액체인 FC-72는 높은 젖음 특성(wetting characteristics)으로 인하여 비등이 시작되기 전까지의 높은 과열온도(superheat)에 기인한 급격한 이력현상(hysteresis phenomena)을 유발시킴으로써 피냉각품의 온도가 지나치게 높아지는 원인이 된다. 또한 피냉각품의 과도한 온도 증가 이후에 비등이 시작되면서 온도가 떨어질 때, 발생하는 열적 충격(thermal shock)에 기인한 전기적 잡음을 일으키는 이력현상을 줄이기 위한 연구가 비등표면의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5680; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: libra@kist.re.kr

개선을 통하여 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁹⁾

Rainey et al.⁽⁷⁾과 Rainey and You⁽⁹⁾는 작동유체로 FC-72를 사용하여 사각기둥핀(pin-fin) 형태의 배열과 미세기공(microporous)을 조합한 비등표면에 대하여 압력, 아냉각(subcooling)과 용해된 가스가 핵비등(nucleate boiling) 성능에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. Abuaf and Black,⁽¹⁰⁾ Guglielmini et al.,⁽¹¹⁾ 그리고 McGillis et al.⁽¹²⁾은 압력이 비등성능에 미치는 영향에 대하여 검토한 결과, 압력이 높을수록, 비등 성능이 좋아진다는 것을 발표하였다. 이렇듯 비등 특성에 대하여 많은 연구자들이 비등표면을 여러 방법으로 가공하여 개선된 비등표면을 통하여 이력현상을 현저히 줄임으로써 비등이 잘 일어나는 장치를 만들 지라도 응축이 잘 되지 않는다면 비등표면의 개선은 그 의미를 잃어버리고 만다. 즉, 비등은 응축부의 조건에 절대적인 영향을 받고 있기 때문이다.

이에 따라 본 연구에서는 작동유체 FC-72(1 atm에서 비등점 : 56°C)에 대하여 비등표면(14×14 mm²)은 매끈하게 가공하였고, 응축표면은 4가지로, 즉 매끈한 표면과 각각 0.3, 0.5, 1 mm 배열 간격을 가지는 2 mm 높이와 1×1 mm² 면적의 사각기둥핀을 가공하여 풀비등(pool boiling) 및 응축실험을 수행하였으며, 비등 및 응축 특성을 비교 분석하여 응축표면의 조건에 따른 비등효과와 열전달특성을 검토하였다. 또한 응축표면의 개선으로 이력현상을 줄일 수 있는 가를 검토하였다.

2. 실험

비등과 응축에 관한 실험을 수행하기 위한 실험장치, 온도 및 압력 측정 및 기록장치, 전원공급장치 그리고 실험용기 안의 공기를 제거하기 위한 진공 펌프에 대한 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다.

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 2에 보여지는 것처럼 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 작동유체인 FC-72를 담은 용기(내부체적 : 40×30×30 mm³), 용기 상부의 응축부와 응축표면(30×30 mm²), 하부에 비등이 일어나는 비등 표면(14×14 mm²)과 비등표면 아래에 원통형 히터(저항 : 281.1 Ω, 외경 : 6.7 mm, 길이 : 21 mm)를 삽입하였고, 슬라이닥스(한창, 용량 : 3 kVA)와 연결하여

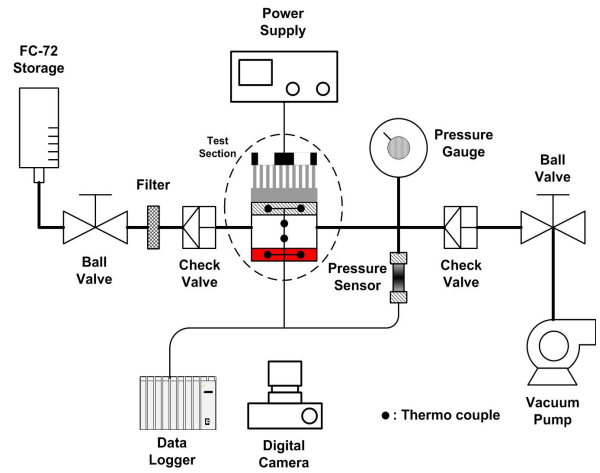


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

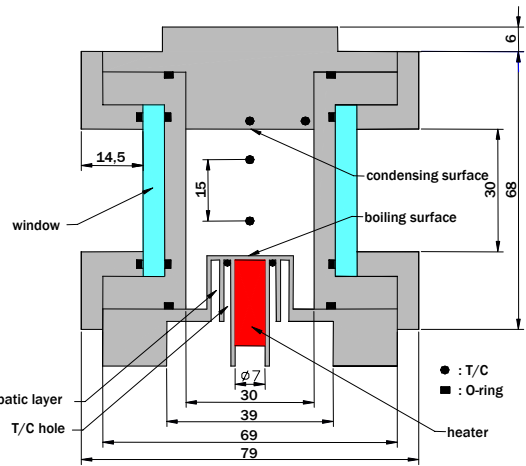


Fig. 2 Test section and T/Cs points.

전압을 조절함으로써 열량을 조절할 수 있도록 구성하였다. 비등표면의 넓이가 응축표면보다 작은 이유는 비등표면의 넓이가 응축표면과 같을 경우 비등표면의 바닥면과 용기의 벽이 만나는 부분의 미세한 틈에서 원하지 않는 기포가 발생되었기 때문에 비등표면을 작게 만들어 용기의 벽면까지 히터의 열기가 덜 미치도록 하여 원치 않는 기포의 발생을 차단하였다. 더구나 원통형 히터 주변에 2.6 mm 간격의 공기 단열층을 두어 히터의 열기가 용기 벽면을 타고 흐르는 것을 방지하였다. 그리고 용기 내에서 일어나는 비등과 응축 현상을 관찰할 수 있도록 용기의 양 옆면에 강화 유리를 설치하였다. 매끈한 표면, 사각기둥핀의 면적(1×1 mm²)과 높이(2 mm)는 같지만 배열 간격은 각각 0.3, 0.5, 1 mm인 4종류로 제작된 응축표면들이 Fig. 3에 개략적으로 나타나 있다. 실험장치의 각 부분은 열전달 성능, 가공성 및

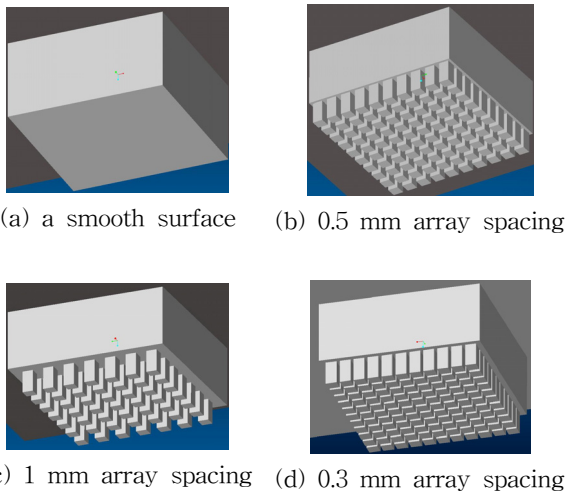


Fig. 3 Schematics of a smooth and three pin-finned condensing surfaces.

견고성을 고려하여 두랄루민으로 제작하였다. 이들의 각 부분은 서로 결합되면서 오링(O-ring)과 볼트를 이용하여 체결함으로써 용기 내의 진공 상태가 유지될 수 있도록 하였다. 응축부의 위에는 알루미늄 방열판($200 \times 132 \times 30 \text{ mm}^3$, 기저두께 : 10 mm, 핀높이 : 20 mm, 핀피치 : 5 mm, 핀수 : 24개)을 장착하였고, 핀 위에는 팬(DENSAN Co., Nidec, 모델 : D12H-12 PLH)을 부착시켜 강제대류로 응축시켰다. 또한 실험용기 외벽으로의 열전달을 차단하기 위하여 용기 외벽에 10 mm 두께의 스티로폼 단열재를 붙였다.

2.2 측정 장치

Fig. 2에 나타나 있는 ●로 표시된 지점에 열전쌍(thermocouple)을 각각 설치하였다. 비등 표면과 응축 표면의 온도를 측정하기 위하여 각각 표면 아래의 두 지점에 열전쌍을 설치하였다. 또한 비등과 응축이 일어나고 있는 용기 내부의 액체와 증기의 온도를 측정하기 위하여 용기의 윗부분과 아랫부분에 각각 한 개씩의 T형 열전쌍을 설치하였다. 실험장치에 6개와 외기온도 측정을 위한 1개의 열전쌍을 data logger(Yokogawa 사, DR230)에 연결시켜 비등과 응축이 일어나는 용기의 각 부분과 외기의 온도를 2초 마다 측정하여 PC에 기록하였다. 용기 내부의 압력을 측정하기 위하여 용기의 한쪽 벽에 압력센서(DRUCK사, PDCR 330)를 연결시켰다. 이 압력센서는 용기 내의 압력 상태를 표시하는 게이지 조절기(DRUCK 사, DPI 101)에 연결시켜 압력을 측정하였다. 비등표면에 가해지는 열량의 조건이 바

뀔 때마다 비등 및 응축표면의 영상을 디지털 카메라(SONY 사, DSC-F717)로 촬영하여 PC에 저장하였다.

2.3 실험 방법

실험할 응축표면을 결정하고, 실험용기 내부의 공기를 0.06 atm까지 진공펌프(SINKU KIKO CO. LTD., OMT-200, 240 l/min)를 이용하여 뽑아낸 후, 작동유체인 FC-72를 약 25 cc 정도 채우면 용기 내부의 압력은 불응축가스가 포함되어 있기 때문에 용기 내의 액체 및 기체의 온도인 약 22°C의 포화압력보다 훨씬 높은 약 0.5 atm에 이르게 된다. 이때, 진공펌프로 다시 불응축 가스가 포함된 FC-72의 증기를 0.18 atm까지 뽑아내면서 용기에 표시된 눈금에 맞춰 작동유체의 양을 15 cc로 조절하여 용기 하단의 열전쌍이 작동유체에 잠기도록 한 후, 밸브로 밀폐시키면 용기 내의 압력은 포화압력에 근접한 0.25 atm이 된다.

히터로 입력되는 전압을 슬라이더스로 조절하며 열유속을 조절하였고, 열유속은 슬라이더스로 출력되는 전압과 히터의 저항을 측정하여 계산하였다. 열유속은 1 W/cm^2 에서부터 시작하여 최대 25 W/cm^2 까지 증가시켰다. 열유속의 증가 폭은 1 W/cm^2 씩 증가시키며 실험한 후, 다시 같은 열유속 간격으로 열유속을 감소시키며 1 W/cm^2 까지 실험을 수행하였다. 하나의 열유속 조건에서 각 부분의 온도가 2분 정도 변화가 없을 때를 정상상태로 간주하였다. 정상상태에 도달하는 시간은 각각의 경우마다 약 20분 정도였다.

과열온도는 실험장치가 정상상태에 이르면 비등표면을 감싸고 있는 액체의 온도를 비등표면의 두 지점에서 측정된 온도의 평균값에서 빼줌으로써 결정된다. 또한 열유속은 공급한 전압의 자승을 히터의 저항으로 나눈 후, 비등표면($14 \times 14 \text{ mm}^2$)으로 나누어 줌으로써 결정된다.

3. 실험결과 및 고찰

매끈한 평면 비등표면에 대하여 응축표면은 매끈한 평면과 각각 0.3, 0.5, 1 mm 배열 간격의 사각기둥핀을 가지는 총 4가지 경우, 과열온도와 열유속에 대하여 열유속이 증가할 때와 감소할 때에 대한 풀비등 곡선을 Fig. 4~Fig. 7에 각각 나타내었다. 또

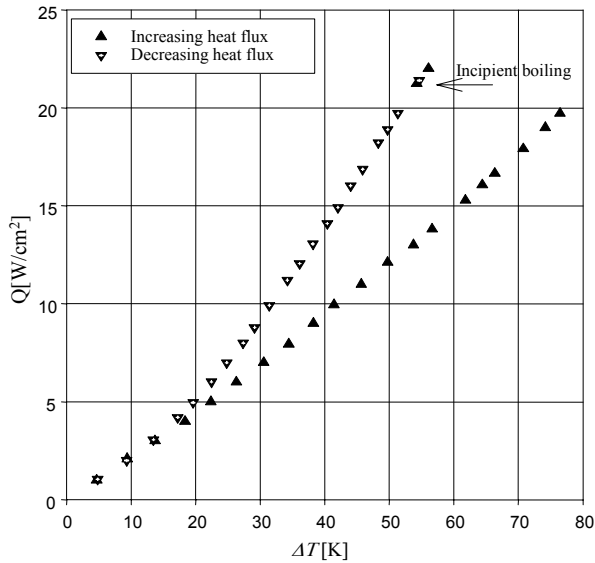


Fig. 4 Pool boiling curves with a smooth flat boiling surface and a smooth flat condensing surface.

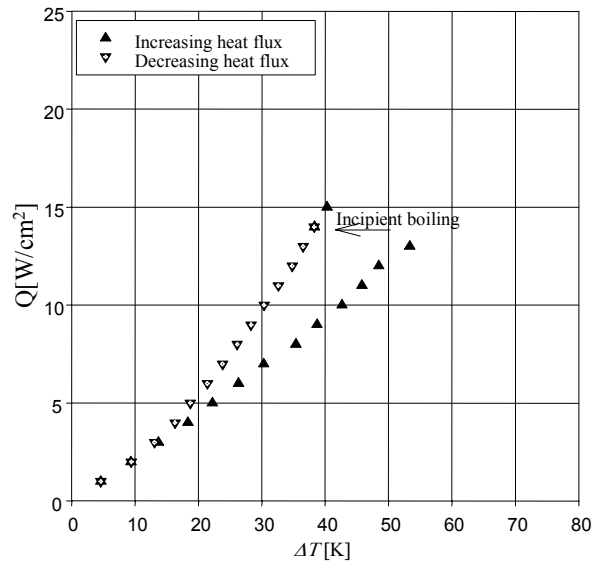


Fig. 6 Pool boiling curves with a smooth flat boiling surface and a pin-finned condensing surface with 0.5 mm array spacing.

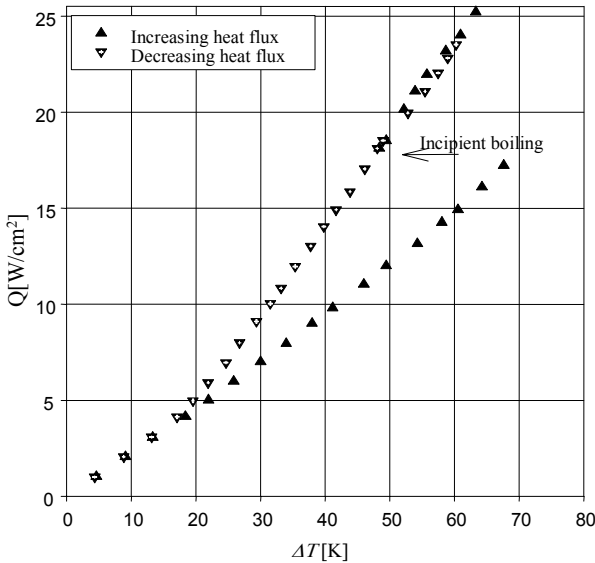


Fig. 5 Pool boiling curves with a smooth flat boiling surface and a pin-finned condensing surface with 0.3 mm array spacing.

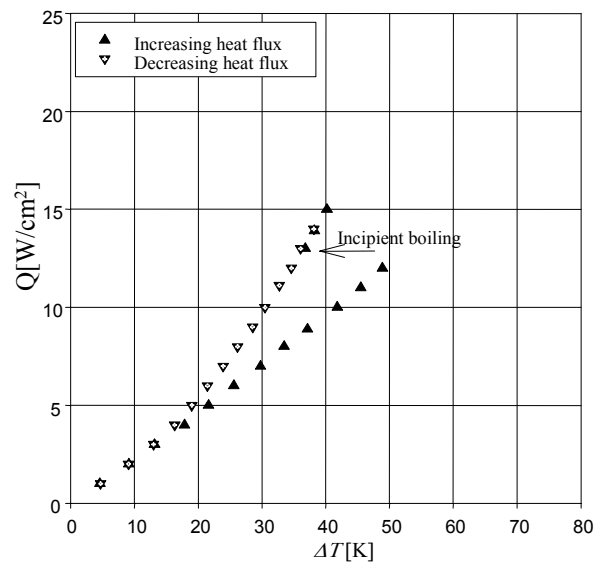


Fig. 7 Pool boiling curves with a smooth flat boiling surface and a pin-finned condensing surface with 1 mm array spacing.

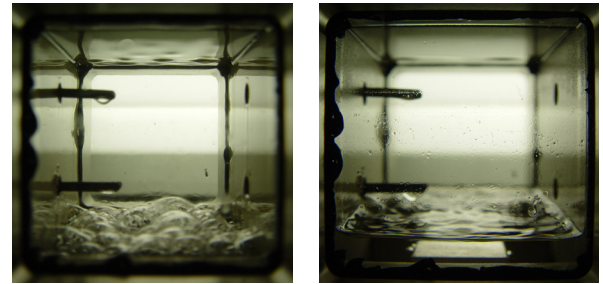
한 각각의 경우에 대하여 열유속이 증가할 때의 비등곡선을 Fig. 9에, 열유속이 감소할 때의 비등곡선을 Fig. 10에 나타내었다.

비등과 응축 표면이 모두 매끈한 평면인 Fig. 4에서의 폴비등 곡선은 상당히 높은 과열온도에 기인한 급격한 이력현상을 동반한 전형적인 비등곡선의 모습을 보여주고 있다. 비등이 시작 직전의 열유속 20 W/m^2 에서 과열온도는 76.5°C 까지 상승하였으며,

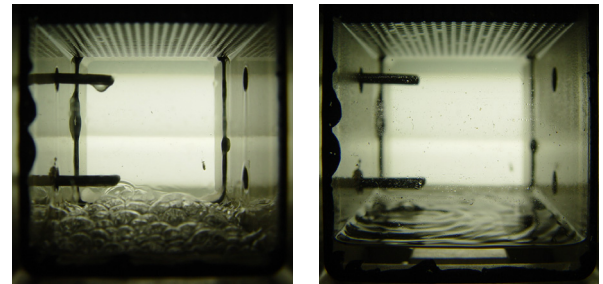
21 W/m^2 의 열유속에서 비등이 시작되면서 과열온도는 54.3°C 로 떨어졌다. 열유속을 감소시킬 때, 같은 열유속 20 W/m^2 에서의 과열온도는 51.4°C 였다. 즉, 이력 폭(hysteresis width)은 25.1°C 로 매우 큰 편이다. 열유속이 감소할 때에는 이미 활성화되어 있는 비등표면의 영향으로 20 W/cm^2 이하 대류구간에서의 과열온도는 열유속이 증가할 때에 비하여 상당히 줄어들음을 보여주고 있다.

매끈한 평면의 비등표면과 0.3 mm 배열 간격의 사각기둥핀을 가진 응축표면의 경우, 과열온도와 열유속에 대하여 열유속이 증가할 때와 감소할 때에 대한 풀비등 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 이 비등 곡선에서도 역시 급격한 이력현상을 보이고 있지만 응축표면이 매끈한 경우보다는 3 W/cm^2 가 더 낮은 18 W/cm^2 에서 비등이 시작되었고, 비등이 시작되기 직전의 열유속 17 W/m^2 에서의 과열온도는 67.6°C 로 비등표면의 최대 과열온도를 매끈한 응축표면보다 약 9°C 정도 낮출 수 있었다. 비등이 시작되면서 비등표면의 온도는 48.4°C 로 역시 매끈한 응축표면보다 약 6°C 정도 낮았다. 열유속을 감소시킬 때, 같은 열유속 17 W/m^2 에서의 과열온도는 46.2°C 이며, 이때의 이력 폭도 21.4°C 로 역시 큰 편이나 매끈한 응축표면보다는 약 3.7°C 를 낮출 수 있었다. 0.3 mm 배열 간격의 응축표면이 매끈한 응축표면보다 좋은 이유는 Fig. 8(a)에 보이는 것처럼 매끈한 응축표면의 경우는 응축표면의 특정한 부분에서만 응축된 액체가 방울져 떨어지지만 Fig. 8(b)에 보이는 것처럼 0.3 mm 배열 간격의 응축표면은 핀과 핀 사이에서 응축되는 액체가 모세관 현상에 의하여 핀 사이를 따라 전후좌우로 급속하게 퍼져 실험용기의 벽면 쪽으로 응축된 액체가 쉽게 흘러내릴 수 있기 때문이다. 물론 응축표면의 사각기둥핀에 의한 응축 열전달면적의 증가도 하나의 이유이다.

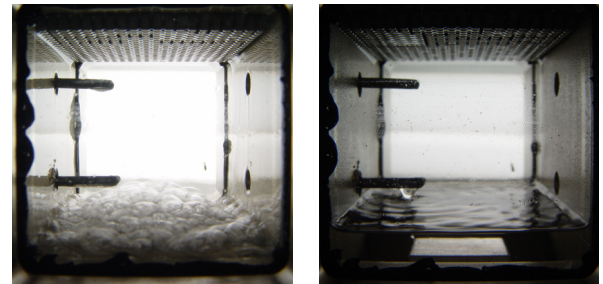
0.5 mm 배열 간격의 사각기둥핀을 가진 응축표면의 경우, 과열온도와 열유속에 대하여 열유속의 증감에 대한 풀비등 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 비등은 14 W/cm^2 에서 시작되었으며, 비등이 시작되기 직전(13 W/cm^2)까지 과열온도는 53.4°C 까지 상승하였고, 비등이 일어나면서 과열온도는 38.3°C 로 떨어졌다. 열유속을 감소시킬 때, 같은 열유속 13 W/cm^2 에서의 과열온도는 36.5°C 이며, 이때의 이력 폭 역시 16.9°C 로 크지만 매끈한 응축표면에 비하여 약 8°C 를, 0.3 mm 배열 간격의 응축표면보다는 4.5°C 를 각각 더 낮출 수 있었다. 비등시작점 역시 매끈한 응축표면보다는 7 W/cm^2 , 0.3 mm 배열 간격의 응축표면에 비하여는 4 W/cm^2 나 일찍 시작되어 풀비등 곡선에서 대류영역을 현저히 줄여 비등영역을 늘임으로써 비등표면의 온도를 많이 떨어뜨릴 수 있었다. 이렇게 0.5 mm 배열 간격의 사각기둥핀을 가진 응축표면이 앞의 두 경우에 비하여 열전달 성능이 현저히 향상된 이유는 응축표면의 사각기둥핀 사이에서 응축된 액체가 0.3 mm 배열 간격의 경우처럼



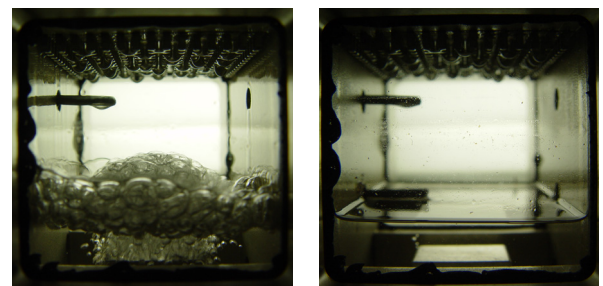
(a) a smooth condensing surface



(b) a pin-finned surface with 0.3 mm array spacing



(c) a pin-finned surface with 0.5 mm array spacing



(d) a pin-finned surface with 1 mm array spacing

Fig. 8 Photographs at incipient boiling(left) and at 2 W/cm^2 for decreasing heat flux(right).

전후좌우로 퍼지지만 0.3 mm 배열 간격만큼 핀 사이를 응축된 액체가 가득히 채우지는 못하는 것을 관찰하였고, Fig. 8(c)에 나타난 것처럼 핀과 핀 사이의 응축된 액체가 듬성듬성 비어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 0.5 mm 배열 간격의 핀이 생성하는 모세관힘이 0.3 mm 배열 간격의 경우보다 더 작기

때문이다. 0.3 mm 배열 간격의 응축표면은 핀 사이에 응축된 액체가 모세관힘에 의하여 가득히 채워져 있는 것을 Fig. 8(b)를 통하여 알 수 있다. 즉, 0.3 mm 배열 간격의 경우는 핀 사이에서 응축된 액체가 모세관 현상에 의하여 핀과 핀 사이로 급속히 퍼져 나가기도 하지만 응축표면의 중앙부분에서는 모세관힘에 의하여 오히려 핀과 핀 사이를 액체가 가득 채우고 있어 응축표면의 핀 사이에서 액막의 두께를 두껍게 하는 요인으로 작용하여 0.5 mm 배열 간격의 경우보다는 응축열전달 효과가 떨어지게 되었다.

1 mm 간격의 사각기둥핀을 가진 응축표면의 경우, 과열온도와 열유속에 대하여 열유속의 증감에 대한 폴비등 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 비등은 13 W/cm²에서 시작되어 0.5 mm 배열 간격의 경우와 비슷하였다. 비등이 시작되기 직전(12 W/cm²)까지 과열온도는 48.9°C까지 상승하였고, 비등이 일어나면서 과열온도는 36.8°C로 떨어졌다. 열유속을 감소시키면, 이때의 이력 폭도 14.3°C로 역시 크지만 매끈한 응축표면에 비하여 약 11°C를, 0.3 mm 배열 간격의 경우보다는 약 7°C를, 0.5 mm 배열 간격의 경우보다는 2.6°C를 각각 더 낮출 수 있었다. 비등시작점 역시 매끈한 응축표면보다는 8 W/cm², 0.3 mm 배열 간격의 경우에 비하여는 5 W/cm², 0.5 mm 배열 간격의 경우에 비하여는 1 W/cm²나 일찍 시작되어 폴비등 곡선에서 대류영역을 가장 많이 줄여 비등표면의 온도를 제일 많이 떨어뜨릴 수 있었다. 이렇게 1 mm 배열 간격의 사각기둥핀을 가진 응축표면이 앞의 모든 경우에 비하여 열전달 성능이 현저히 향상된 이유는 Fig. 8(d)에 보여지는 바와 같이 응축표면의 사각기둥핀 사이에서 응축된 액체가 0.3, 0.5 mm 배열 간격의 경우처럼 핀 사이에서 액막을 형성하지 않고 방울져 곧바로 떨어져 버리기 때문에 핀 사이는 곧 새롭게 응축되는 액체로 채워질 수 있고, 채워진 후에도 곧 액적이 되어 떨어짐으로써 가장 좋은 응축 열전달 효과를 보이게 된다.

앞에서 언급한 4가지 종류의 응축표면에 대한 실험결과들을 열유속이 상승하는 경우와 감소하는 경우에 대하여 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내어 비교하였다. 열유속을 증가시키면서 얻어진 Fig. 9는 비등 시작점만 같다면, 마치 하나의 조건에서 실험한 것처럼 보인다. 마찬가지로 열유속을 감소시키면서 얻어진 Fig. 10의 경우도 하나의 조건으로 실험한 것처럼 보인다. 이는 같은 비등표면의 조건에서는 응축표면의 형상이 바뀌더라도 비등 시작점에

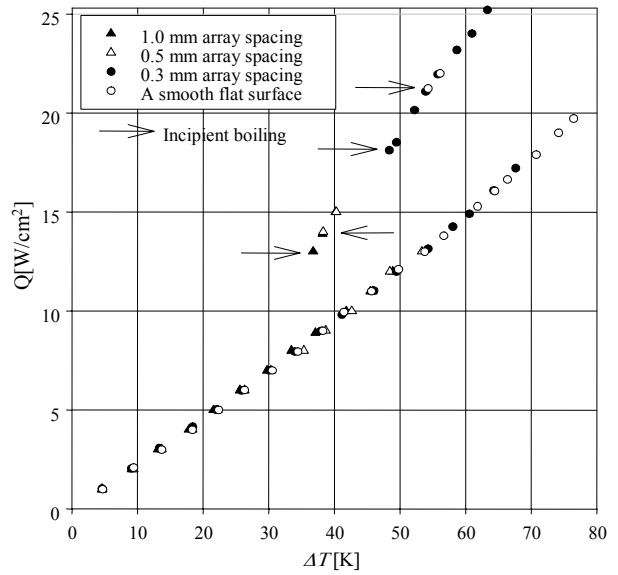


Fig. 9 Pool boiling curves for increasing heat flux.

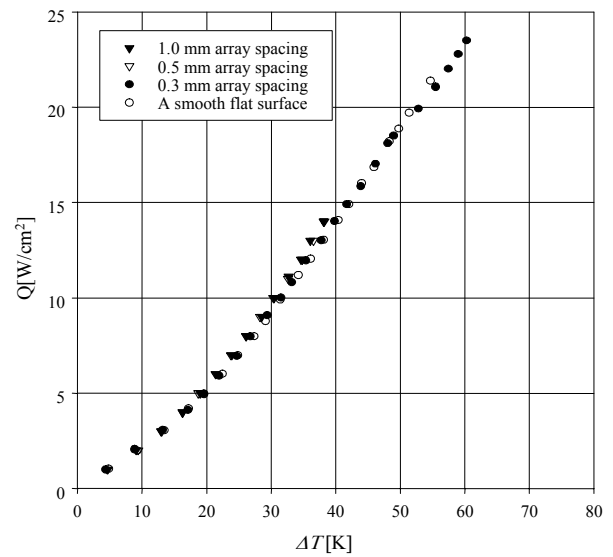


Fig. 10 Pool boiling curves for decreasing heat flux.

만 영향을 줄 뿐 열유속과 과열온도에 대한 폴비등 곡선은 같게 된다는 것을 의미한다.

4. 결론

FC-72로 충전된 소형용기 내에서 하나의 매끈한 비등표면에 대하여 매끈한 응축표면, 0.3, 0.5, 1 mm 배열 간격의 사각기둥핀을 가진 응축표면을 바꿔가며 폴비등 실험을 수행하였다.

실험 결과, 매끈한 응축표면에 비하여 편형 응축 표면이 이력현상과 과열온도를 줄일 수 있었다. 1 mm 배열 간격을 가지는 사각기둥핀을 가지는 응축 표면은 나머지 조건의 응축표면에 비하여 가장 많이 이력현상을 줄임으로써 피냉각품에 과도한 온도 상승이나 열적 충격을 보다 줄일 수 있음을 보여주었다. 즉, 응축표면의 개선을 통하여 이력현상을 줄일 수 있었고, 따라서 응축표면이 비등 시작의 조건에 절대적인 영향을 미치고 있음을 알았다.

그리고 비등표면의 조건이 같다면 응축표면의 형상이 바뀌더라도 비등 시작점만 다르게 나타날 뿐 열유속과 과열온도에 대한 풀비등곡선은 같게 나타났다.

참고문헌

1. Baker, E., 1973, Liquid immersion cooling of small electronic devices, *Microelectronics and reliability*, Vol. 12, pp. 163-173.
2. Oktay, S., 1982, Departure from natural convective(DNC) in low temperature boiling heat transfer encountered in cooling micro-electronic LSI devices, *Proc. 7th Int. Heat Transfer Conference*, Munich, Germany, Vol. 4, pp. 113-118.
3. Marto, P. J. and Lepere, Lt. V. J., 1982, Pool boiling heat transfer from enhanced surface to dielectric fluid, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 292-299.
4. Bar-Cohen, A. and Schweitzer, H., 1985, Thermosyphon boiling in vertical channels, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 772-778.
5. Anderson, T. M. and Mudawwar, I., 1988, Microelectronic cooling by enhanced pool boiling of dielectric fluorocarbon liquid, *ASME Proc. of the 1988 Natural Heat Transfer conference*, Vol. 1, pp. 551-560.
6. Maddoz, D. E. and Mudawwar, I., 1988, Single and two-phase convective heat transfer from smooth and enhanced microelectronic heat source in rectangular channel, *ASME Proc. Of the 1988 Natural Heat Transfer conference*, Vol. 1, pp. 533-541.
7. Rainey, K. N., You, S. M. and Lee, S., 2003, Effect of pressure, subcooling, and dissolved gas on pool boiling heat transfer from microporous, square pin-finned surface in FC-72, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 23-35.
8. Piore, I. L., Rohsenow, W. and Doerffer, S. S., 2004, Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5033-5044.
9. Rainey, K. N. and You, S. M., 2000, Pool boiling heat transfer from plain and microporous square pin, finned surfaces in saturated FC-72, *J. Heat Transfer*, Vol. 122, No. 3, pp. 509-516.
10. Abuaf, N., Black, S. H. and Staub, F. W., 1985, Pool boiling performance of finned surfaces in R-113, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 6, No. 1, pp. 23-30.
11. Guglielmini, G., Misale, M. and Schenone, C., 1996, Experiments on pool boiling of a dielectric fluid on extended surfaces, *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, No. 4, pp. 451-462.
12. McGillis, W. R., Carey, V. P. Fitch, J. S., and Hamburgren, W. R., 1991, Pool boiling enhancement techniques for water at low pressure, *Proc., Seventh Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, IEEE, New York, pp. 64-72.