

〈論 文〉

국부적인 발열부분을 가진 표면에서의 잠김 비등열전달 — 전자부품 액침 냉각에서의 응용 —

하 광 순* · 최 상 민**

(1990년 12월 19일 접수)

Boiling Heat Transfer from a Locally Heated Surface — A Simulated Electronic Device under Liquid Immersion Cooling —

Kwang Soon Ha and Sangmin Choi

Key Words : Liquid Immersion Cooling(액침냉각), Electronic Device(전자부품), Pool Boiling(잠김비등), Locally Heated Surface(국부적으로 발열하는 표면)

Abstract

The pool boiling behavior of a heated surface has been investigated experimentally, focusing on the cases when only a part of the contact surface is heated. Characteristic boiling curves are obtained with circular metal surface test pieces heated below while immersed in Refrigerant-113. Locally heated test pieces are fabricated by inserting a heating block at the center inside a larger conducting block. Overall heat transfer rates are measured while the experimental conditions are systematically varied. The local temperature profiles along the radius are measured for conducting blocks. It is found that the conjugated boiling condition exists and the total heat fluxes should be correlated to a suitably defined temperature difference.

1. 서 론

열유속 q'' (W/m²)과 발열표면액체 사이의 온도차 ΔT (K)의 관계를 로그-로그 그래프 상에 나타낸 비등곡선에서 볼 때, 자연대류 영역 기울기보다 비등 열전달 영역에서의 기울기가 일반적으로 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 이는 임계 열유속에 도달하기 전까지에서는 발열부분과 냉각 액체 사이의 온도차가 크게 변하지 않더라도 비등열전달량은 많이 바뀔 수 있음을 뜻한다. 한편, 균일하지 않은 온도분포를 가지는 발열체의 경우에는 국부적으로 열전달률이 심각하게 변하게 되며 전체 열전달량에 대

하여 표시하여 줄 수 있는 온도차를 주의깊게 결정하여야 할 것이다. 열전도체가 부분적으로 열을 받게 되면 전도체 내부에는 온도구배가 발생하며 이러한 전도체의 표면이 비등액체와 접촉하고 있다면 전도에 의한 열전달과 비등열전달을 함께 고려해야 하는 복합열전달 문제가 된다. 이러한 상황이 실제로 일어나는 대표적인 응용에 중 하나가 단위면적당 집적도가 크게 증가하면서 열방산을 용이하게 하기 위하여 개발되고 있는 전자부품의 액침냉각 방법이다^(1~6). 본 연구의 목적은 액침냉각에의 응용을 고려하여 잠김비등(pool boiling) 조건에서 접촉표면의 온도가 불균일한 경우의 열전달 현상, 특히 액체가 포화온도에 놓여있는 상태에서 비등 개시 이전의 자연대류 및 핵비등 상태일 때의 경우를 고찰하여 보다 효율적인 액침냉각법을 제안하는데 있다. 이를 위해 국부적으로 제한된 발열부

* 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

분을 가지고 액체와 접촉하는 금속표면의 시험편을 제작하고 열전달률을 측정하는 실험장치를 구성하였다. 비등액체로서는 전자부품 냉각에 많이 응용되는 프레온-113을 사용하였다.

2. 실험장치

2중조(double bath)로 구성된 항온장치 속에 파이렉스 유리 비이커의 용기를 담고, 그 안에 비등액체로 프레온-113을 넣는다. 이 프레온 속에 시험편인 히터블럭을 담고, 전력 공급선과 열전대의 선들을 데이터 수집장치에 연결하여, 데이터를 컴퓨터로 처리할 수 있게 한다(Fig. 1 참조). Fig. 2와 같이, 히터 블럭은 가열부, 전도 열전달부, 그리고 단열부의 3부분으로 구성된 원통형으로 되어 있다. 가열부는 지름 12.7mm, 길이 12.7mm인 구리 블럭(또는 알루미늄 블럭)에 절연테이프를 얇게 붙이고 그 위에 지름이 0.22mm인 니크롬 열선을 감아서 만들었다. 열선은 전기절연을 위해 에나멜 페인트를 칠하고, 약 20Ω 정도의 저항을 가지도록 길이가 조정되었다. 전도부는 다양한 지름에 길이 25.4mm인 원통형 구리로 되어 있고, 가열부와 끼워맞춤을 위해 약 0.05mm 미만의 여유간격을 두고, 원활한 열전달을 위해 이 간격에 열전도성 실

리온 그리스를 발랐다. 그렇지만 시편 구조 특성상 열저항을 완벽하게 무시할 수 있도록 제작하기는 어려웠다. 단열부는 12.7mm 두께의 아크릴을 사용하여 반경방향과 축방향으로 열전달이 무시할 정도로 작아지도록 하였다. 액체와 접촉하여 열전달이 일어나는 부위는 표면의 영향을 가능한 줄이기 위해 No. 1200의 사포(砂布)로 연마하였다. Table 1에서 DI는 단열부를 제외한 히터의 직경을 나타내며, 시편 #1과 #2는 전도부가 없이 가열부와 단열부만으로 이루어진 것이다. 또한 single은 한 개의 열전대가 히터중앙($R=0$)에 설치된 것을 뜻하며 multiple은 7개의 열전대가 지정된 반경 위치에 설치된 것을 뜻한다. 모든 열전대(K 또는 T형)의 두 접점은 시편표면에서 2mm 되는 지점과 비등액체 내부에 각각 설치하여, 히터표면과 액체의 온도차를 곧바로 읽을 수 있도록 하였다. 실험 진행의 편의를 위해 비등액체의 온도를 측정하기 위한 별도의 열전대를 설치하였다. 열전대에서 발생한 전압과 히터에 가해지는 직류전압은 데이터 수집장치의 디지털 전압계에서 읽혀져 각각 온도와 발열량으로 환산되었다. HP9816 컴퓨터가 HP3497A 스캐너, HP3456A 시스템 볼트미터, HP6633A 파워 서플라이를 제어하게 된다. 결과의 출력을 위해 HP2563A 라인 프린터와 HP7475A

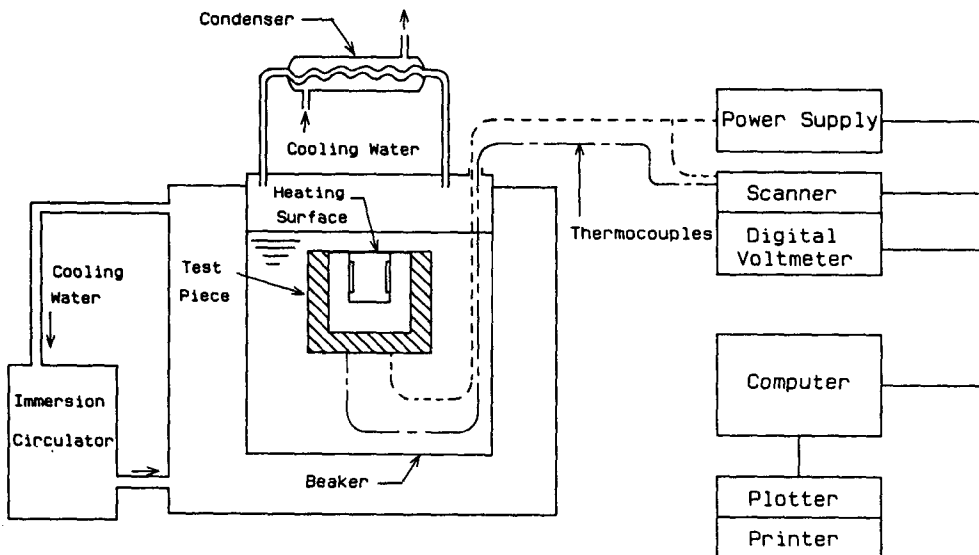


Fig. 1 Experimental apparatus

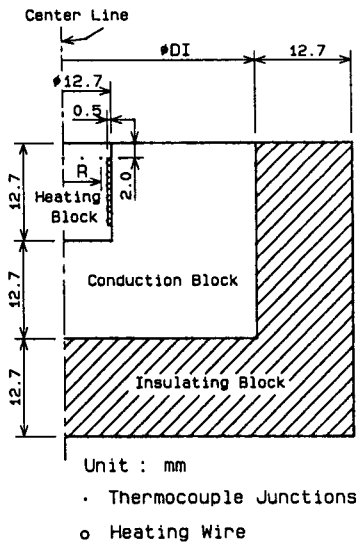


Fig. 2 Test piece dimension

Table 1 Test piece details

No.	Block materials	DI(mm)	Thermocouple
#1	Cu-Acryl	12.7	Single
#2	Al-Acryl	12.7	Single
#3	Cu-Cu-Acryl	25.4	Single
#4	Cu-Cu-Acryl	38.1	Single
#5	Cu-Cu-Acryl	50.8	Multiple R=0, 2.5, 5.0, 7.5, 10, 15, 20mm

그래픽 플로터가 사용되었다.

3. 실험절차

콘덴서에 냉각수를 공급한 후 프레온-113을 용기 안의 히터블럭이 완전히 잠기도록 부은 다음 프레온이 포화온도(1 atm에서 47.5°C) 가까이 다다르도록 항온조의 온도를 올린다. 실험의 전과정을 통하여 프레온의 온도는 포화온도에서 유지된다. 프레온의 온도가 정상상태가 되었을 때 모든 계기를 준비시키고 미리 작성된 컴퓨터 프로그램을 실행시킨다. 우선 저항을 측정하고 후 갑작스런 전압상승을 막기 위해 전압을 5초 간격으로 0.2V 씩 5번에 걸쳐 1V 올린 다음 시험편이 평형상태가 되도록 5분

동안 기다린다. 5분 경과후 히터의 공급전압과 열전대의 전압을 10번 측정하여 평균한 후, 공급전압 평균은 실험전에 측정된 저항과 함께 발열량으로 계산되고, 열전대 전압평균은 온도로 환산되어 저장된다. 동시에 온도차와 발열량이 로그-로그 그래프로 표시된다. 이와 같이 한단계가 끝나면, 다시 1V를 앞서와 같은 방법으로 올린 후 다음 과정이 반복된다. 히터의 안전을 위해 임계 열유속을 지나 40°C 이상의 온도차가 생길 경우 실험은 자동적으로 중지되며, 전원공급장치(power supply)의 전압도 영으로 된다. 모든 단계가 끝나면 그동안 저장되었던, 온도차, 발열량, 비등액체의 온도 등이 디스크 파일에 최종적으로 저장되고, 그래픽 플로터를 통해 그래프가 얻어진다. 비등곡선은 히터표면과 액체와의 온도차 $\Delta T(K)$ 에 대한 단위면적당 열유속 $q''(W/m^2)$ 이 로그-로그 축에 표시된다.

측정한 ΔT 와 q'' 에 대한 불확실도 분석(uncertainty analysis)을 하였다. 히터에 가해지는 전압 측정, 열선의 저항측정, 실험중 열선저항의 변화, 시편제작시 측정오차, 단열부로의 열손실, 열전대에 의한 온도환산과정, 비등액체의 온도변화, 비등액체 내부의 온도분포, 히터 내부 2mm 깊이의 온도측정으로 인한 표면온도와의 차이 등으로 발생하는 불확실도에 대하여 고려하였다. 그 결과 ΔT 의 전체 불확실도는 4.0%, q'' 의 전체 불확실도는 7.2%로 나타났다.

4. 실험결과

Fig. 1과 같은 실험장치를 이용하여 얻은 비등실험결과를, 발열표면의 온도와 포화 온도인 비등액체 온도와의 차이 $\Delta T(K)$ 와, 열유속 $q''(W/m^2)$ 의 좌표축상에 도시한 것이 Fig. 3이다. 가열시 자연대류 영역과 핵비등 영역에서 각각 로그-로그 그래프상의 선형성을 뚜렷이 볼 수 있으며, 각 영역사이의 급격한 전환과 비등발생 이전의 과열현상(temperature overshoot)도 관찰할 수 있다. 냉각시에도 비슷한 비등곡선을 얻을 수 있으나 overshoot는 존재하지 않으며 각각의 열유속 조건에서 정상상태에 도달한 이후에도 상당한 시간을 기다렸으나 온도차는 약간씩 다르게 나타나고 있다.

Fig. 4는 비등액체 프레온이 과냉(subcooled) 상태일때와 포화(saturated)상태일때의 차이를 발열

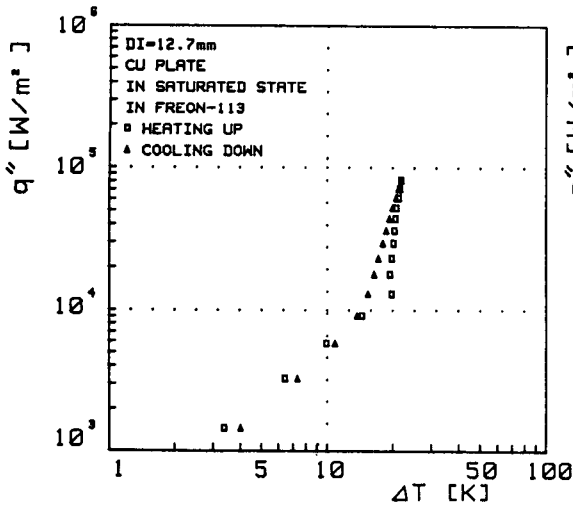


Fig. 3 Heating-up and cooling-down in saturated boiling conditions

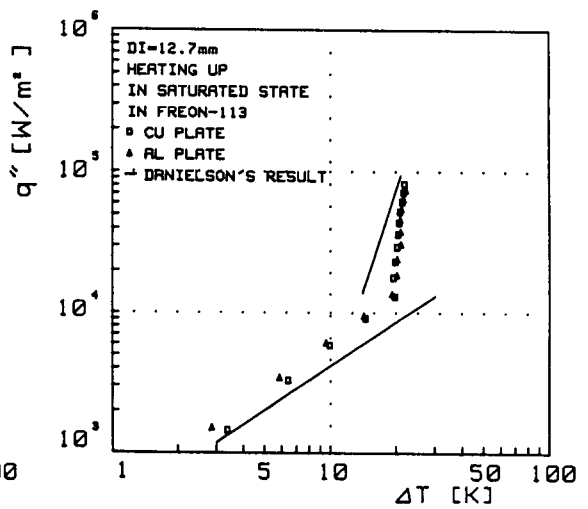


Fig. 5 Effect of surface material

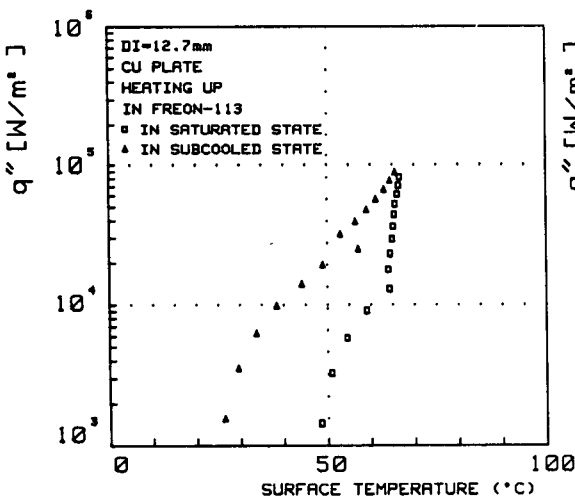


Fig. 4 Saturated and Subcooled boiling

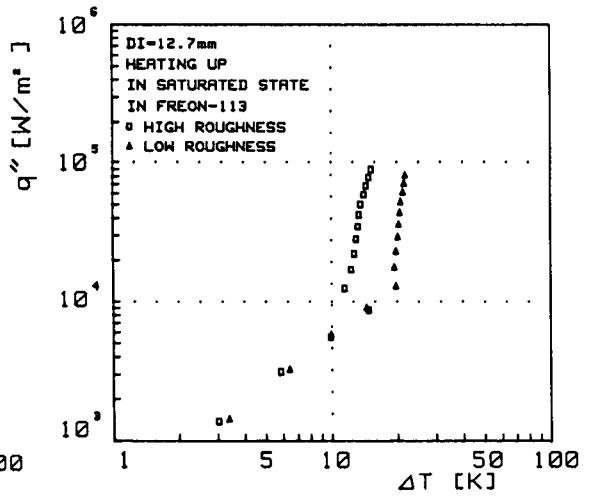


Fig. 6 Effect of surface roughness

표면의 온도와 열전달량의 축상에 나타낸 것이다. 이 그래프는 비교의 목적을 위하여 반로그 축으로 작성되었다. 자연대류 영역에서는 같은 표면온도를 기준으로 보았을 때(예를 들어 $T_s=50^{\circ}\text{C}$ 의 경우), 발열표면과 액체 사이의 온도차가 큰 과냉 상태에서의 열전달량이 훨씬 크다. 그러나 비등열전달 상태에서는 표면온도의 증가에 따른 열전달량의 변화율이 포화온도 조건에서 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 포화온도에 다다른 액체의 경우가 과냉 상태보다 기포의 생성이 용이하여 열전달량을 늘리는데

보다 효율적이기 때문으로 이해할 수 있다.

Fig. 5는 발열표면재료의 변화가 비등곡선에 미치는 영향을 보여주고 있다. 두개의 그래프가 거의 일치하는 것으로 보아 표면재료의 영향은 무시할만한 것으로 생각된다. 이 그림에서 직선으로 표시된 것은 0.25mm 직경을 가진 길이 8mm의 백금선을 발열체로 하는 Danielson의 실험결과⁽⁶⁾이다. 본 실험과 Danielson의 결과를 비교할 때, 자연대류 부분과 핵비등 부위의 로그-로그 그래프상의 선형적 관계와 그 경계 영역에서의 overshoot 등 전체적

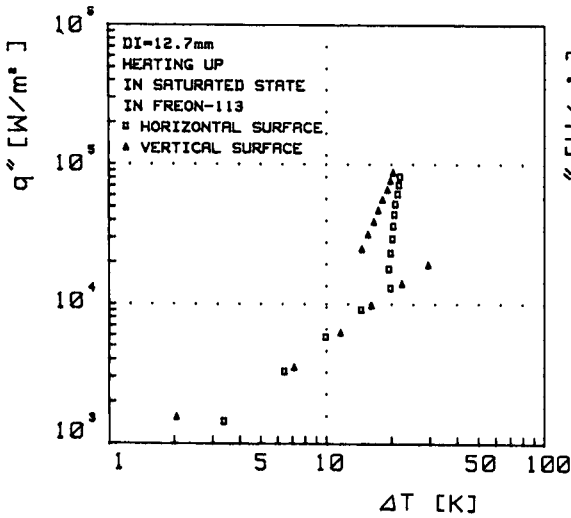


Fig. 7 Effect of surface configuration

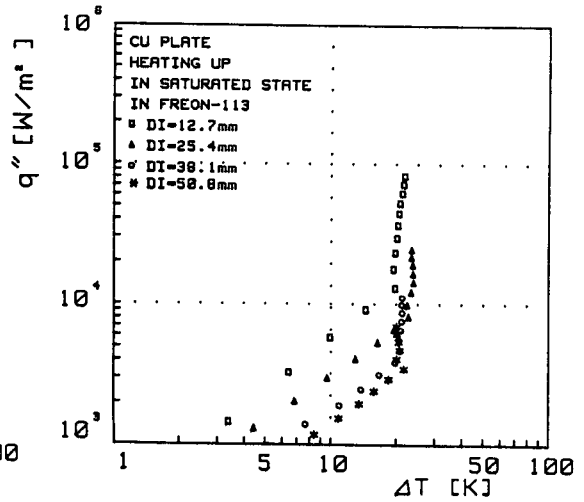


Fig. 8 Conjugated boiling heat transfer (heat flux based on the entire surface area)

인 경향성에서 일치하지만, 구체적인 데이터 값에 있어서는 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 보다 구체적으로 Fig. 5의 자연대류 영역과 핵비등 영역의 값들을 각각 최소자승법을 이용하여 $q'' [W/m^2] = C\Delta T^n$ 으로 curve fitting한 결과와 Danielson의 결과를 Table 2에 비교해 놓았다. 이 실험에서 구한 식에 의한 계산값과 실험치와의 평균오차는 ΔT 로 q'' 를 구할 때 5.6%, q'' 로 ΔT 를 구할 때 2.4%이다.

Fig. 6은 가열표면의 거칠기에 따른 비등곡선의 변화이다. 시편의 거칠기 정도는 각각 사용된 사포와 연관이 되어 있으나 표면거칠기 시험장치로 측정된 평균거칠기 Ra 값으로 high roughness의 경우는 $0.6\mu m$, low roughness의 경우는 $0.3\mu m$ 정도이다. 이 그림에서 볼 때 자연대류 영역에서는 표면거칠기와 큰 관련이 없지만, 핵비등 영역에서는 표면거칠기가 증가할수록 기포의 생성이 용이하

여 열전달량을 크게 증가시키는 것을 볼 수 있다. Fig. 5와 6의 결과로 재료의 표면거칠기가 기포형성에 영향을 줄 정도로 클 때에만 열전달량에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 왜냐하면, 재료의 변화도 미시적인 관점에서 표면상태의 변화로 이해할 수 있으나 Fig. 5에서와 같이 차이를 발견할 수 없는 반면에 육안관측으로도 거칠기가 다르게 나타날 정도의 시편을 사용한 결과인 Fig. 6에서는 특별히 기포가 발생하는 비등 영역에서 차이를 보여주고 있기 때문이다.

Fig. 7은 가열표면을 수평으로 했을 때와 수직으로 했을 때의 결과이다. 자연대류 영역에서는 두 결과가 거의 일치하지만, 핵비등 영역에서는 다소의 차이를 보인다. 이는 수직 발열체의 경우에 표면에서 떨어져 나간 기포의 흐름이 그 윗부분의 표면에 생긴 기포의 제거에 영향을 주어 냉각효과를 보다 좋게 만들어 주기 때문이다.

Fig. 8은 일정한 가열표면에 전도부를 첨가한, 전도와 비등(또는 자연대류)의 복합 열전달 상태를 검토한 경우의 실험결과이다. 즉 가열부는 직경 12.7mm로 고정되어 있으나 전도부가 첨가되어 전체 직경이 25.4, 38.1 및 50.8mm인 경우를 기존 시편에서의 결과와 함께 표시한 것이다. 전도부가 있는 경우에도 비등은 발열부위에 집중해서 일어나고 있으며 전도부와 냉각액체와의 접촉면에서는 자연대류 열전달 영역에 머무르고 있다. 이 그림에서는

Table 2 Curve fitting constants for $q'' = C\Delta T^n$

Items		C	n
Cu, DI=12.7mm	Convective region	2.52×10^2	1.35
	Boiling region	1.00×10^{-12}	12.7
Danielson's	Convective region	3.70×10^2	1.05
	Boiling region	5.73×10^{-2}	4.70

열유속 q'' 가 가열부와 전도부를 합한 전체면적으로 나눈 값으로 계산되었고 온도차는 발열부 중심에서의 온도와 냉각액체의 포화온도 차이를 기준으로 하였다. 여기에서 보면 어느 일정 열전달량의 경우에 온도차가 더욱 크게 나타나는 것으로 그래프를 읽을 수도 있다. 다시 말하면 같은 ΔT 일 때 전도부를 첨가한 경우, 열전달량이 오히려 줄어드는 것처럼 보인다. 그러나 실제로 총 열전달량 q 는 전체 표면적이 늘어났기 때문에 훨씬 크며, 이와 같은 오류의 원인은 전도부의 바깥부분에서의 온도차가 중심부와 다른 것을 고려하지 않고, 전체 면적을 기준으로 계산한 단위면적당 열전달량 q'' 과 중심부의 온도차 ΔT 를 비교 표현했기 때문이다. 이것은 중심으로부터의 거리에 따라 온도가 달라지면 그에 따라 열전달 특성도 달라지는 복합상황을 고려해야 하는 것을 뜻한다.

Fig. 9는 같은 실험결과를 가열부의 면적만을 기준으로 계산한 열유속 q'' 에 대하여 나타낸 것이다. 여기에서도 온도차는 발열부 중심과 냉각액체의 사이에서 측정되고 있다. 중앙에 발열부가 있는 경우 전도부를 첨가하면 중앙의 온도차를 낮게 유지하면서도 같은 열량의 전달효과를 얻을 수 있다. 그림에서 보면, 자연대류 영역에서는 전도부를 첨가함으로써 중앙의 온도집중을 막으면서 열전달량을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 핵비등이 시작되는 온도는 전도부의 첨가여부와 관계없음

을 알 수 있다. 즉 핵비등이 시작되는 온도는 전도부 존재 여부와 관계없이 중앙에서의 온도차 기준으로 볼 때 거의 같은 것을 볼 수 있다. 그리고 핵비등이 시작된 이후로는 비등은 중앙의 발열부 표면에서만 일어나고 있다. 전체 열전달량은 중앙의 비등 영역과 주위 전도부의 자연대류 영역 각각에 해당하는 전달량을 더한 것으로 나타나야 한다. 일단 핵비등이 일어나면 비등이 일어나는 부위와 자연대류 상태로 남아있는 부위의 열전달 기술 방법이 다르므로 각각을 나누어 생각해야 한다. 따라서 열전달 표면의 온도구배를 정확히 파악하여야 전체적인 열전달량을 계산할 수 있다.

Fig. 10에서는 전도부의 바깥 직경이 50.8mm인 경우에 몇가지 q'' 에 대하여 반경방향에 따른 온도구배를 보인 것이다. 이 그림에서 $q'' < 60000 \text{ W/m}^2$ 일때는 아직 비등이 일어나지 않은 경우이다. 여기에서 $R=6.4\text{mm}$ 까지는 가열부에 해당한다. 그림에 따르면 대략 크게 두개의 온도 범위 즉 가열부의 온도와 전도부의 온도로 나누어 생각할 수 있다. 즉 $R=6.4\text{mm}$ 를 기준으로 $R=0, 2.5, 5.0$ mm의 값들을 평균하여 구한 가열부의 온도차 ΔT_H 와, $R=7.5, 10, 15, 20\text{mm}$ 의 값들을 평균하여 구한 전도부의 온도차 ΔT_L 의 두 ΔT 를 고려하고 각각의 값들에 대해 실험결과식(Table 2)을 이용해 전체 열전달량 q 를 계산할 수 있다. 그 계산식은 다음과 같다.

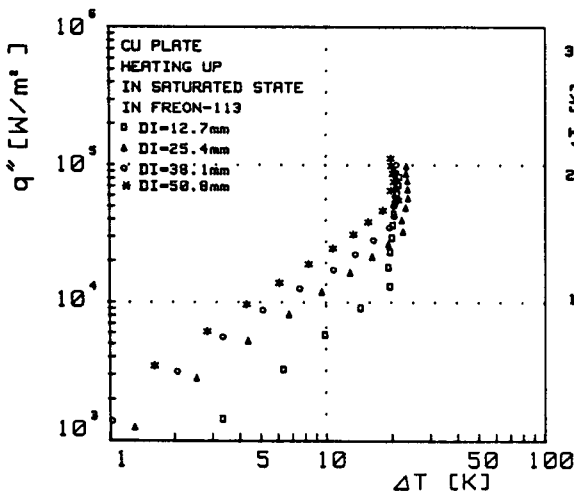


Fig. 9 Conjugated boiling heat transfer(heat flux based on the heater surface area)

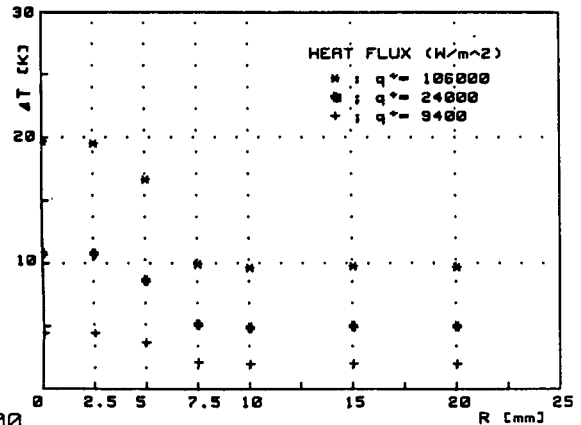


Fig. 10 Temperature profile on the conjugated boiling block with diameter of 50.8mm

$$q = C_1(\Delta T_n)^{n_1}[\pi R^2] + C_2(\Delta T_L)^{n_2}[\pi(R_T^2 - R^2)]$$

여기에서 R' 은 6.4mm이고, R_T 는 전체반경 즉 25.4mm이다. 비등이 일어나지 않을 때 C_1 , n_1 , C_2 , n_2 는 Table 2에서 자연대류 영역에 해당하는 값이고, 비등이 일어날 때는 C_1 , n_1 은 핵비등 영역의 값, C_2 , n_2 는 자연대류 영역의 값이다.

Fig. 11은 앞에서와 같은 계산결과로 얻은 열전달량 q_{cal} 과 실험으로 얻은 q_{exp} 을 비교한 것이다. 그림에서 $q > 8W$ 일때는 가열부에서 비등이 일어나고 있는 경우이다. 이 그림의 처음 자연대류 영역에서는 실험값과 계산값이 잘 맞아들어가지지만 핵비등 영역에서는 계산값이 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 이는 핵비등 영역에서는 작은 ΔT 의 변화에도 매우 높은 열유속 방산이 가능하므로, ΔT 측정상의 작은 오차가 계산값에 큰 영향을 주기 때문이다. 따라서 위의 식은 핵비등 영역에서 ΔT 를 이용해 열유속 q'' 을 계산하는데는 적합하지 않다. 그러나 q'' 을 이용해 ΔT 를 구하는 것은 가능하다. 비등이 일어나기 시작하면 비등면의 온도상승이 눈에 띄게 크지 않아도 열유속은 크게 늘어날 수 있다. 다시 말하면 표면온도 상승없이도 높은 열유속의 방산이 가능하다. 이것은 열방산 설계의 입장에서 비등열전달이 갖는 커다란 장점이라 할 수 있다. 즉 발열체의 온도를 낮게 유지하면서 많은 양의 방열이 가능하게 되는 것이다. 실험에서는 총발

열량이 증가하면서 비등면의 온도는 거의 일정하게 (실험의 오차 범위내에서) 유지되었으나 전도부의 온도는 조금씩 상승하였다. 이를 통하여 비등표면과 전도부 표면 모두에서 비교적 높은 방열이 가능해지는 것이다.

5. 결론 및 제언

(1) 프레온-113을 냉각액체로 비교적 넓은 평판에서의 잠김비등 실험을 통하여 얻어진 비등곡선에서 자연대류 영역과 핵비등 영역의 단위면적당 열전달량 q'' 은 $q'' = C\Delta T^n$ 의 식으로 표시할 수 있다.

(2) 비등액체의 온도가 포화상태일 때 핵비등 영역에서의 열전달량의 증가율이 과냉상태에서 보다 더 크다.

(3) 발열표면의 거칠기는 기포의 크기에 상당할 정도로 클 때 열전달량에 영향을 줄 수 있다.

(4) 수직표면일 때 수평표면일 때보다 비등상태에서 열전달이 효과적이다.

(5) 국부적인 발열부분과 전도부분을 가지는 발열표면일 경우 전도부분의 증가로 열전달량을 늘릴 수 있으나 비등이 시작되는 온도는 변화시킬 수 없다.

(6) 열전달량을 정확히 기술하기 위해서는 발열체 표면의 온도차를 주의깊게 결정하고 그에 따라서 자연대류 영역과 핵비등 영역을 구분하여 계산해야 한다. 단위면적당 열전달량을 표현할 때는 내부의 온도구배를 고려하여야 하므로 전체면적을 기준으로 하는 것은 좋지 않다.

이상과 같은 실험의 결론으로부터 다음과 같이 액침냉각 방법에 대해 제안할 수 있다.

(1) 국부적인 발열부와 전도부가 있을 경우 자연대류 영역에서는 전도부의 크기에 따라 이를 고려하는 것이 매우 중요하며, 국부적으로 비등이 일어날 경우에는 비등 부위와 자연대류 부위를 나누어 생각하여야 한다.

(2) 비등이 시작되는 온도는 주위에 전도부가 있다해도 일정하며, 일단 비등이 시작되면 열유속이 증가해도 표면온도의 증가는 극히 미소하므로 설계자는 이 비등온도를 극한 설계조건으로 응용할 수 있다.

(3) 비등시작온도는 전도부의 크기와는 관련이 없으나 표면거칠기와 비등액체의 온도와는 관계가 있다. 비등시에는 발열표면이 수직이며 표면거칠기

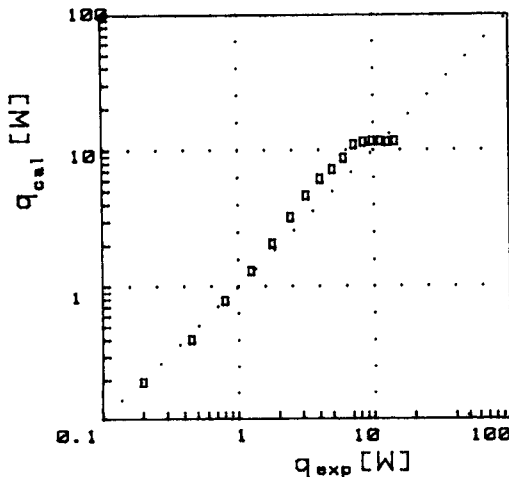


Fig. 11 Comparison of experimental with calculated values

가(기포의 크기에 상응할 정도의 수준에서) 높을수록 열전달에 보다 효율적이다.

(4) 전자부품과 같이 비교적 넓은 표면적을 가진 발열체가 액침냉각 될때의 설계자료로서 앞에 제시한 열전달 실험식을 사용할 수 있다. 그러나, 비등 열전달에서 열유속과 온도차 관계의 특성을 사전에 파악하고 있어야 실험식 사용에 따른 문제점을 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Oktay, S., 1982, "Departure from Natural Convection(DNC) in Low-Temperature Boiling Heat Transfer in Cooling Micro-Electronic LSI Devices", Heat Transfer 1982, Hemisphere.
- (2) Hijikata, K., T. Nagasaki, and N. Kurata, 1988, "A Study on the Boiling Heat Transfer from Diode Elements in an Integrated Circuit Chip", The First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference.
- (3) 최상민, 1989, "집중열원이 있는 방산판의 열전도 해석-전자부품 냉각에서의 열집중 현상", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제 4 호, pp. 726~733.
- (4) 전진석, 강상우, 김익생, 광호영, 1988, "전자부품의 액침냉각을 위한 수조에서의 비등열전달의 실험적 연구", 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 683~686.
- (5) Park, K.A. and Bergles, A.E., 1988, "Effects of Size of Simulated Microelectronic Chips on Boiling and Critical Heat Flux", ASME, J. of Heat Transfer Vol. 110, pp. 728~734.
- (6) Danielson, R.D., Tousignant, L. Bar-Cohen, A., 1987, "Saturated Pool Boiling Characteristics of Commercially Available Perfluorinated Inert Liquids", ASME-JSME Thermal Engineering Conference, pp. 419~430.