

경사진 가열면에서의 수조비등에 대한 가시화 연구

김재광* · 송진호* · 김상백* · 김희동*

An Experimental visualization of the Pool Boiling Heat Transfer on the Inclined square surface

J.K.Kim*, J.H.Song*, S.B.Kim* and H.D.Kim*

Key Words: Critical Heat Flux, Inclined heating Plate, Bubble generation, Boiling heat transfer

Abstract

An experimental study was carried out to identify the various regimes of natural convective boiling and to determine the Critical Heat Flux(CHF) on a 70mm square surface which is inclined at 180° (upward), 90°, 45°. The heater block made of copper with cartridge heaters is submerged in a water tank with windows for visualization. As the heat flux increases from 100kW/m² to 1.1MW/m², the heat transfer regime migrates from the nucleate boiling to film boiling and results in a rapid heat up of the heater block. An explosive vapor generation on the heated surface, whose size and frequency are characterized by the heat flux, is visualized by using a digital camcorder with 512×512 pixel size at 30fps.

기호설명

q''	단위면적당 열속	W/m ²
ρ	밀도	kg/m ³
i	단위질량당 엔탈피	J/kg
g	중력가속도	m/s ²
σ	물의 표면장력	N/m
k	열전도 계수	W/mK
dx	거리차	m
dT	온도차	°C
T_w	표면온도	°C
$T_{measured}$	열전대로 측정된 온도값	°C
T_{sat}	포화온도	°C
μ	점도	N · s/m ²
C_p	비열	J/kgK
하첨자		
f	액체	
g	기체	
fg	기체와 액체간의 각종 상태량 차이	

1. 서론

수조비등(Pool boiling) 열전달은 가열면의 온도를 그다지 상승시키지 않고 많은 열을 전달할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가열면의 열속이 임계 열속(Critical Heat Flux)에 도달하면 열전달이 핵비등으로부터 막비등으로 변화하고 가열면이 급속히 가열되면서 파손될 수 있으므로 출력을 임계 열속이하로 유지시키는 것이 매우 중요하다. 이러한 수조비등 열전달은 표면처리를 통해 임계 열속값을 높임으로써, 액체상태의 프로판, 부탄등과 같은 위험한 화학물질을 안전하게 저장하는데 응용되고⁽¹⁾, 혹은, 고속 집적회로의 냉각 및 초소형 열교환기에의 응용⁽²⁾과 같이 많은 공학분야에 이용되면서 가열면의 각도가 임계열속에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

기포의 생성에 의해 하향면 기준으로 경사각이 커질수록 임계열속이 커진다는 것이 Ishigai et

* 한국 원자력 연구소

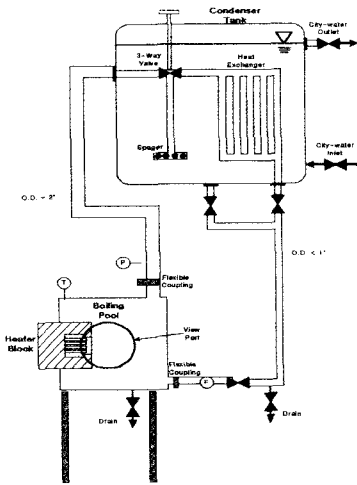


Fig.1 Schematic of test facility

al.⁽³⁾ 과 Githinji and Sabersky⁽⁴⁾ 등에 의해 알려졌다. Nishikawa등⁽⁹⁾은 가로, 세로 길이 4.2cm, 17.5cm 인 수직 가열면을 사용하여 0.7MW/m²까지의 임계 열속 근처까지 열속에서 기포거동을 가시화하였다. 그리고 Galloway & Mudawar⁽⁷⁾는 한번이 1cm인 조그만 히터를 사용하여 수조비동이 아닌 유동비동(Flow boiling)에서 최대 2m/s까지의 유속을 주어 1mm 이내의 기포 거동을 국부적으로 관찰하였고, 열속이 높아질수록 기포거동은 주기적으로 관찰되었다. 하지만 이들은 가열면적을 작게 설계하여 국부적인 기포거동을 가시화 했다.

물에 대해 좀 더 거시적인 기포거동을 관찰하고 각도의 영향에 따른 임계열속을 구하기 위해선 충분한 열출력을 낼 수 있는 히터용량 설계가 필요하다. 따라서 본 실험에선 대기압 조건에서 물을 사용하였고, 거시적인 기포거동 관찰을 위해 가열 면적을 한 번의 70mm인 정사각형으로 설계하였고 최대 1.5MW/m²까지 열 출력을 낼 수 있게 설계하였다. 임계 열속까지 출력에 따른 기포거동을 관찰하기 위해, 상용 디지털 캠코더로 촬영을 하였다.

2. 실험장치 및 방법

전체 실험장치 구성도는 Fig. 1에 나타나 있고, 히터블럭(Heater block)과 히터블럭이 들어있는 수조(Test section), 복수기로 이루어 졌다. Test

section은 전열면(Heating surface)을 측면과 정면에 서 관찰할 수 있는 창이 설치되어 있다. 히터블럭은 재질이 99%구리인 원통형 구리블럭을 일체형으로 가공하여, 전면부는 정육면체, 후면부는 원통형으로 가공하였다. 전면부의 정육면체는 한번이 70mm인 전열면적을 갖고, 총 16개의 직경 0.5mm인 Copper-Constantan열전대(T type, ungrounded junction type, 허용오차 ± 1°C)를 설치하였다. 16개의 Cartridge heater(KEBG 0080 C005A, 600W)가 원통형의 후면부에 전면에 균일한 열속을 낼 수 있도록 설치되었다. Fig.2에 설명되었듯이, 열전대는 전열면의 위치에 따른 열속분포를 측정하기 위해, 가열면 표면 4군데에, 표면으로부터 깊이방향으로 2mm, 4mm, 8mm, 12mm지점에 설치하였다. 열전대는 히터블럭 후면부로부터 삽입되었다. 이를 위해서, 직경 3mm인 4개의 구리봉을 사용하였고, 각각의 구리봉마다 4개의 열전대를 설치하였다.

대기압으로 Test section을 설계하였고, 경사각을 줄 수 있게 Test section 한쪽 측면 고정시켰다. 수조크기는 9.6kW(600W× 16)의 히터 용량으로 충분하게 물의 포화온도를 유지할 수 있게 한번이 400mm인 정육면체(총 물의 질량: 64kg)로 설계하였다. 실험조건을 유지하기 위해 Immersion heater(2kW, 220V)를 사용하여 간헐적인 가열을 하였다. 고온에 견디면서 촬영을 해야하므로 정육면체 각 면에 재질이 Poly-carbonate이고, 두께가 10mm인 관찰창을 설치하였다.

복수기는 300리터의 물탱크를 사용하여 수조형태로 설계하였다. 실험 중에 발생하는 기화열을 효과적으로 복수기로 전달하기 위해 열 교환용 튜브를 설치하였다. 이때 열교환용 튜브는 직경이 1인치이고, 길이 25cm인 구리파이프 8개를 연결하여 최대 10kW 열 용량을 제거할 수 있게 설계하였다. 만약 제거할 수 있는 최대 열용량을 초과한다면 복수기내의 물 온도는 상승하고, Test section내부에 가압이 될 수 있다. 열용량 초과시 수조내 유동을 주어 열을 제거할 수 있도록 설계하였다. 또한 임계 열속 근처에서 순간적인 압력이 발생하여 가압될 수 있으므로, 3way valve를 사용하여 배출할 수 있도록 하였다.

Test loop은 폐쇄회로(Closed loop)로 구성되어 있다. 실험조건은 대기압, 포화상태이다. 우선, 에탄올을 사용하여 가열면 표면에 산화막을 제거하

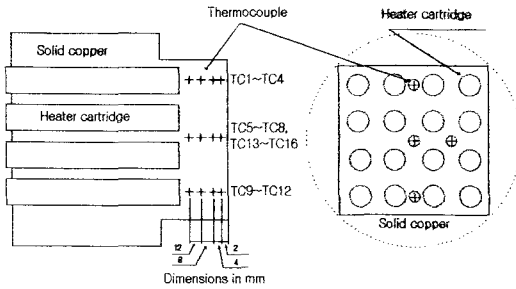


Fig.2 Positions of the thermocouples in the heater

였다. 비응축성 가스의 영향을 없애고, 포화조건을 만들기 위해, 작동유체인 물을 충분히 가열하여, 실험조건을 만들었다. 실험은 먼저 $0.1\text{MW}/\text{m}^2$ 에서 임계열속에 도달하기까지 약 $0.1\text{MW}/\text{m}^2$ 씩 증가시키면서 정상상태의 출력을 주어 열속측정을 하였고, 가열면의 경사각은 180° (상향면), 90° , 45° 를 주어 실험하였고, 그와 동시에 임계열속근처에서 일반 디지털 캠코더(SONY, DCR-TRV 900)를 사용하여 촬영하였다. 임계열속근처에서 SCR방식을 사용한 온도제어를 통해 출력제어를 하였다. 히터에 공급되는 출력은 전압계(FLUKE787)과 전류계(HIOKI3282)를 통해서 측정하여, 열전대를 사용하여 계산한 값을 비교 열손실을 측정하였다(Fig). 열전대 등의 모든 계측장비에서 나오는 신호는 HP-VXI DAS(Data Acquisition System E1401B)에 60Hz 간격으로 Sampling해서 저장되었다.

3. 실험 결과

3.1. Heat flux.

표면 열속은 축방향과 반경방향의 온도분포를 T-type 열전대로 측정하여, 일차원 열전도 방정식을 사용, 계산하였다. 전체적으로, 각 지점에서의 온도편차는 T-type 열전대의 오차범위인 약 1K 이고, 구리블럭이 충분한 열전도율로 공간적으로 균일한 열속으로 측정되었다. Fig.3은 열전대로 계산한 전체표면의 평균 열속치와 전류계와 전압계로 측정된 값을 비교하였다. 약 $0.7\text{MW}/\text{m}^2$ 까지

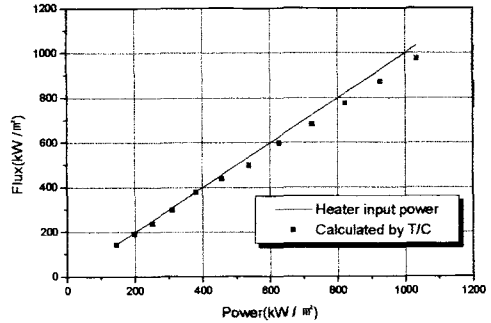


Fig.3 The power to flux

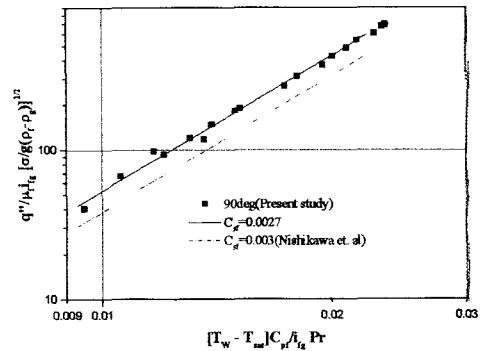


Fig.4 Comparison of other experiments

열손실이 거의 없고 임계 열속 근처로 갈수록 약 10%이내의 열손실로 각 경사각에 따른 충분한 열속을 얻을 수 있었다.

표면 열속은 다음과 같은 1차원 열전도 방정식을 사용하여 계산하였다.

$$q'' = k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기서, k 는 400K 에서의 구리 전도도이고, 표면에서 2mm 지점의 열전대와 표면에서 12mm 지점의 열전대를 사용하여, 거리와 온도차를 구하였다.

$$T_w = T_{\text{measured}} - \frac{q''}{k} dx \quad (2)$$

또한, 표면 온도는 구하여진 열속값을 사용하

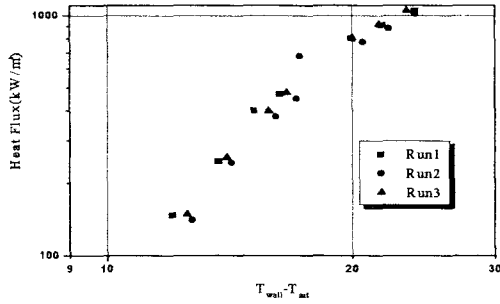


Fig.5(a) Saturated water pool boiling data for 180° inclination (upward).

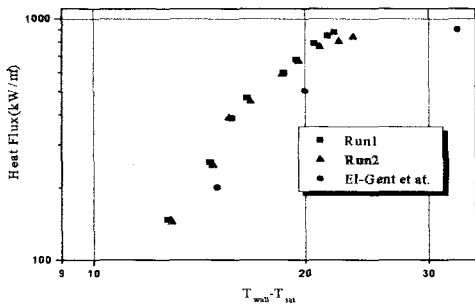


Fig.5(b) Saturated water pool boiling data for 90° inclination

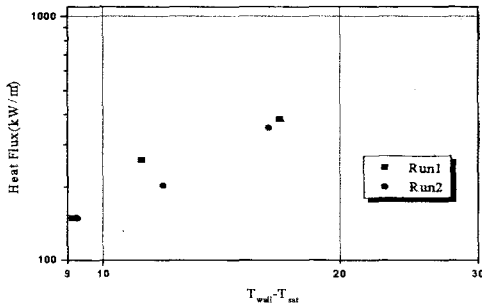


Fig.5(c) Saturated water pool boiling data for 45° inclination.

여, 표면에서 2mm지점의 열전대 값을 외삽하여 구하였다.

Fig.5(b)에 El-Gent et al⁽⁶⁾의 실험 데이터와 비교한 그림을 보면, 최대 열속값인 임계 열속은 약

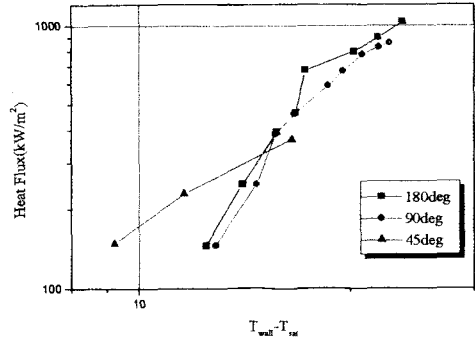


Fig.6 A comparison of saturated water pool boiling data for some inclination angles.

0.9MW/m²로 비슷한 값을 구할 수 있었다. 하지만 표면 과열도가 약 10K 정도 차이가 난다. 이는 실험방법의 차이로, disk heater를 사용하여 직접적인 가열 후 급냉(quenching)시켜 열속을 구하였기 때문에 표면온도가 차이가 난다고 판단된다. 대체로 수직면에서의 임계열속은 약 0.8에서 약 0.9MW/m²로 알려져있다.⁽⁶⁾ Fig.5 와 Fig. 6에 경사각에 따른 열속을 표면과열도에 따라 도시하였다.

3.2. Rohsnow correlation

본 실험의 결과를 다음의 Rohsnow 관계식⁽¹⁰⁾을 사용하여 실험자료를 분석하였다.

$$\frac{C_{pf}(T_w - T_{sat})/i_{fg}}{C_{sf}[q''/i_{fg}\mu_f(\sigma/g(\rho_f - \rho_g))^{1/2}]^m Pr_f^n} = \quad (3)$$

C_{sf} 는 특정 액체-고체표면 조합이 핵생성 상태량에 미치는 영향을 대변하는 상수이다. m 과 n 은 넓은 압력범위의 여러 액체에 대해 0.33과 1.7이 사용될 수 있으나, 물인 경우 Pr 의 단조로운 함수가 아니므로, $n=1$ 이 좀 더 정확한 결과를 준다. 이 관계식을 사용하여 fitting한 후, 다른 실험결과와 비교하였다. C_{sf} 값이 0.0027로 0.7MW/m²이하의 낮은 열속에서 수직 가열면 실험을 한 Nishikawa등⁽⁹⁾의 경우와 비슷한 경향을 보였다.



Fig.6 Pool boiling photographs at near CHF for some inclined surface(180° , 90° , 45°)

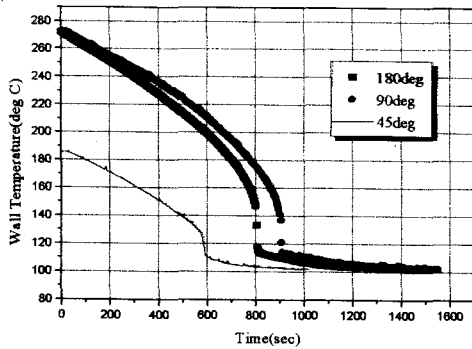


Fig.7 Cooling pattern of the inclined surfaces

3.3. 기포 거동

45도, 90도, 180도(상향면)의 경사각에서 기포거동을 디지털 캠코더로 관찰하였다. 주로 낮은 열속에선 특징적인 거동이 나타나지 않지만, 열속이 증가할수록 주기적인 경향이 나타난다.

주로 약 0.3MW/m²에서 경향이 나타나고 가열면이 180도인 경우(상향면)엔 기포가 표면에 달라붙은 상태에서 잠시 머물렀다가 떨어아가는 모습을 보인다. 가열면이 90도가 되면 기포들이 물결모양의 형태를 보이면서 표면을 따라 이동한다. 45도인 경우에서도 주기적으로 기포들이 물결형태로 흘러가지만 90도에서처럼 원활하게 흘러가진 않는다. 최근에 Howard, A.H. and Mudawar, I.⁽⁸⁾의 직접식 가열로 경사각에 따른 가시화실험에서 보면, 15도에서 120도까지(하향면을 0도로 기준)는 수직면 영역으로 기포거동이 물결형태를 보인다. 기포 거동이 가장 활발한 180도 가열면인 경우는 최대 열속이 약 1.1MW/m²이고 90도

가열면은 약 0.9MW/m², 그리고 90도 가열면과 비슷하게 주기적인 기포거동을 보이는 45도 가열면인 경우는 기포가 크지않아 임계열속이 약 0.4MW/m²로 낮은 열속을 보였다.

3.4. 냉각 거동

히터 출력(Power)을 약 122kW/m²로 증가 시킨 후, 약 70초 동안 열속, 표면온도, 압력은 심한 변화를 보이면서, 막비등영역으로 천이되었고, 이때 출력을 차단한 상태에서 냉각거동을 관찰하였다.

기포거동은 막비등 영역에서 형성됐던 얇은 막이 패치(patch)형태로 떨어져 나가면서, 핵비등 영역의 역과정으로 진행된다. 막비등 영역에서, 열속은 일정한 값을 갖는다. 평균적으로 경사각에 따라 65kW/m²에서 142kW/m²로 측정되고, 핵비등 영역으로 천이되는 시점에서 최대 563kW/m²의 열속이 측정된다. 이 후 핵비등 영역에선 완만한 곡선을 그리면서 열속은 감소한다.

경사각이 45도인 경우는 임계열속이 비교적 낮은 편이고 표면온도도 상대적으로 낮은 편이어서 냉각속도가 빠르다. 하지만 임계열속이 높아 표면온도가 급격히 상승하는 수직면(90도)와 상향면(180도)인 경우에서, 임계 열속이 약 1.1MW/m²로 가장 높은 상향면이 수직면보다 빨리 냉각되었다.

4. 결론 및 향후계획

대기압 조건에서, 수조비등 실험을 통해, 임계 열속까지의 열전달 자료를 측정하고 경사각에 따른 기포거동을 물리적으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

구하여진 사각 가열면에서의 열전달 자료를 Rohsenow 상관식을 사용하여 5% 이내로 fitting할 수 있었고, 낮은 출력에서의 자료를 Nishikawa의 실험자료와 비교한 바, 일치함을 알 수 있어서, 얻어진 자료의 신뢰도를 확보할 수 있었다. 대체로 경사각이 증가할수록 임계열속이 커지는 경향을 보여 기존의 경향과 일치함을 보였다.

본 연구가 기존실험과 가열방식이 다르고 가열면의 형상도 다르기 때문에 앞으로 좀더 다양한 각도에서의 실험을 통하여 다른 실험 자료를 보완하는 작업이 필요하다.

후기

본 연구는 원자력 연구소 중장기 연구과제에 의해 지원되었다.

참고문헌

- (1) Jung, D. S. Venart, J. E. and Sousa, A. C. M. 1987, "Effects of enhanced surfaces and surface orientation on nucleate and film boiling heat transfer in R-11, *Int. J. Heat Mass Transfer* 30, 2627-2639
- (2) Liang, H. S. Yang, W. J. and Vrable, D. L. 1998, "Feasibility study of immersion cooling of multi-graphite composite surfaces. *Proceedings of 11th IHTC. Korea*, Vol.2, pp.512-526
- (3) Ishigai, S. Inoue, K. Kiwakik, Z. Inai, T. 1961, "Boiling heat transfer from a flat surface facing downward, *Proceedings of the International Heat Transfer Conference, Boulder, Co*, pp. 224-229
- (4) Githinji, P. M. Sabersky, R. H. 1963, "Some effects of the orientation of the heating surface in nucleate boiling," *ASME. Journal of Heat Transfer* 85 379
- (5) Guo, Z. and El-Genk, M. S. 1992, "An experimental study of saturated pool boiling from downward facing and inclined surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 35. pp.2109-2117
- (6) Bui, T. D., Dhir, V. K., 1985, "Transition boiling heat transfer on a vertical surface," *Transactions of ASME*, Vol.107, pp.756-763
- (7) Galloway, J. E. and Mudawar, I., 1993, "CHF mechanism in flow boiling from a short heated wall - I, Examination of near-wall conditions with the aid of photomicrography and high speed video imaging," *Int. J. Heat Transfer*, Vol.36, pp.2511-2526
- (8) Howard, A. H. and Mudawar, I., 1999, "Orientation effects on pool boiling critical heat flux(CHF) and modeling of CHF for near-vertical surfaces," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.42, pp.1665-1688
- (9) Nishikawa, K., Fujita, Y., Uchida, S. and Ohta, H. 1984, "Effect of surface configuration on nuclear boiling heat transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.27, pp.1559-1571
- (10) Rohsenow, W. M. 1952, "A Method of correlating heat transfer for surface boiling of liquids," *Trans. ASME.*, Vol.74, pp.967-976
- (11) Rohsenow, W. M. 1973, "Boiling in Handbook of heat transfer," McGraw-Hill, New York, pp.13-28
- (12) Kim, J. K. Song, J. H. Kim, S. B. and Kim, H. D. 2000, "An experimental study on the pool boiling heat transfer on a square surface," *Proceedings of the korean nuclear society autumn meeting, daejeon, korea*