'2000 추계계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사각 평면에서의 수조 비등에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Pool Boiling Heat Transfer on a Square Surface

김재광, 송진호, 김상백, 김희동
한국원자력 연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 사각 가열면에서의 수조 비등 거동에 대해 실험적으로 열전달 계수를 구하고, 비등 열전달 거동을 고속 비디오 카메라를 이용하여 가시화 하였다. 사각면에서의 비등 열전달은 고속 집적회로의 냉각, 초소형 열 교환기, 원자력 발전소에서 중대사고가 발생하였을 경우 원자로외벽의 냉각 등을 포함하는 다양한 공학적인 분야에 활용된다. 카트리지 히터가 장착된 구리 블록을 시창이 있는 수조에 넣어 실험을 수행하였다. 가열면은 폭이 70mm인 정사각형 구조를 가지고 있고 히터의 최대 출력은 1.8 MW/㎡ 이며 열전대를 구리 블록 내부에 설치하여 열속을 측정하였다. 히터의 열속을 100 kW/㎡ 부터 1.0 MW/㎡ 까지 증가 시키면서, 임계 열속까지의 열전달 계수를 상향판, 수직판, 하향판에 대하여 측정하였다. 임계 열속 부근에 도달하자 열전달 영역이 핵비등에서 급격히 막 비등영역으로 변화되어 히터 표면의 온도가 급 상승하였다. 가열면에서의 기포 거동을 1000 fps의 속도를 가지는 고속 비디오 카메라로 촬영하여 열속의 변화에 따르는 기포의 거동을 가시화하였다. 기포가 폭발적으로 가열면으로부터 발생되는 것을 볼 수 있었으며, 그 크기 및 발생 주기가 열속의 변화, 가열면의 각도에 따라 그 특성이 변화되는 것을 관찰할 수 있었다.

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 square surface. The basic knowledge on the boiling heat transfer and CHF on the square surface is necessary for various engineering problems, such as the design of compact heat exchangers, cooling of CPU chips, and design of the external cooling mechanism for the reactor during the severe accidents in the nuclear power plants. The heater block made of copper with cartridge heaters in it is submerged in a water tank with windows for visualization. The heater surface has dimension of 70 mm x 70 mm and the maximum heat flux capacity is about 1.8 MW/㎡. The boiling heat transfer coefficient for the various flow regimes up to CHF has been measured for upward facing surface, vertical surface, and nearly horizontal downward facing surfaces. The temperatures of the heater block are measured by the thermocouples imbedded in the heater block. As the heat flux increases from 100 kW/㎡ to 1.0 MW/㎡, the heat-transfer regime changes from the nucleate boiling to the CHF. Near 1.0 MW/㎡, the heat transfer regime suddenly changed from nucleate boiling to film boiling and it resulted in a rapid heat up of the heater block. The various boiling patterns on the vertical surface, upward facing surface, and downward facing surface are observed by a high speed video camera whose frame rate is 1000 fps. An explosive vapor generation on the heated surface, whose size and frequency is characterized by the heat flux and inclination angle, is observed.

1. 개요

비등 열전달은 가열면의 온도를 그다지 상승시키지 않고 많은 열을 전달할 수 있다는 장점 때문에 많은 공학 분야에 응용되고 있다. 그러나 가열면의 열속이 임계 열속 (Critical Heat Flux)에 도달하면 열전달 거동이 급격히 핵 비등 (Nucleate boiling)으로부터 막비등 (Film boiling)으로 변화되어 가열면이 급속히 가열되어 가열면이 파손될 수 있으므로 열속을 임계 열속 이하로 유지 시키는 것이 매우 중요하다. 사각 가열면에서의 열전달은 고전적인 연구[1]로부터 최근 고속 집적회로의 냉각 및 초소형 열 교환기에의 응용 [2,3], 원자로의 중대사고시 원자로 외벽 냉각[4,5,6] 등에 관심이 기울여 지면서 새롭게 조명 되고 있다.

중대사고시에는 노심의 핵연로가 녹아 내려서 원자로 하반구에 쌓이게 된다. 녹은 핵열료부터 붕괴열에 의해 지속적으로 열이 발생되므로 원자로가 파손되어 핵연료 및 방사능 물질이 외부에 누출되지 않도록 하는 것이 중대사고 완화 측면에서 매우 중요하다. 최근에 중대사고 완화 방안의 하나로 원자로 공동에 물을 공급하여 원자로의 외벽을 냉각하는 방안에 대한 연구가 이루어 지고 있다[4]. 원자로 용기의 외벽이 반구형이므로 이를 이차원적으로 단순화 하거나[4], 규모가 작은 반구 형태로 모사하거나[5], 수평면으로 단순화[6] 하여 임계 열속에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다. 이러한 실험적인 연구의 결론은 외부 냉각에서 열적여유는 수직면에서의 임계 열속에 지배 받는 다는 것이다. 그런데 종전의 연구들은 실험자료가 불충분하거나 [5], 가열면의 종횡비가 가열 방법에 의해 제한[6]되어서 불확실도가 많이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 종전의 연를 보강하기 위하여 정사각형 가열면을 이용하여 비등열전달 및 임계열속에 대한 실험을 수행하고자 한다. 가열면을 수직, 상향, 하향면으로 배치하여 각도의 영향에 따른 열전달 계수 및 임계 열속의 변화를 실험적으로 측정하였다. 비등 열전달 기구를 체계적으로 규명하기 위하여 열전대에 의한 온도 측정 뿐 아니라, 고속 비디오 카메라에 의한 기포의 고동을 아울러 관찰 하였다.

2. 실험 장치 설명

실험장치의 주요부는 그림 1과 같이 히터블럭과 히터블럭이 들어있는 수조(test section),복수기로 이루어졌다.

2.1 히터블럭

히터블럭은 수직면에서 CHF는 약 1MW/㎡근처에서 발생하기 때문에 충분한 열출력 설계가 필요하다. 열손실등을 감안하면 최소한 1.5MW/㎡정도 내야하고 전면에 균일한 열속을 낼 수 있도록 설계하였다.

가로 세로 길이 70mm 사각형 평면에 Watlow사의 cartridge heater(KEBG0080C005A)를 사용하였다. 사양은 직경 10mm 이고 길이가 80mm, Watt density가 29W/㎠ (230V, 600W) 로 70×70mm 평면에 가로, 세로 4 ×4로 16개를 배열하였다. 전체 히터블럭은 외경이 100mm이고 길이가 100mm인 원통형 구리 블록을 전면부 30mm를 가로 세로 70mm로 가공해서 일체형으로 되어있다.

히터블럭에 온도분포를 측정하기 위해서는 전면부에 열전대를 설치, 측정하였다. 열전대는 오차범위가 ±1℃인 Omega사, 직경이 0.5mm T type을 사용하였는데 이때 열전대 설치용 구리봉에 4mm 간격으로 4개 설치 총 4개의 봉을 사용하여 구리블럭 내로 총 16개를 설치하였다. 전면부는 물과 직접 닿아 있는 부분이므로 고온의 히터블럭을 충분히 실링할

수 있는 물질인 실리콘(용융온도 650。F)을 사용하였다. 히터블럭은 세라쿨이라는 절연체를 사용하여 감싸고 히터블럭지지 구조물에 설치하였다. 이는 그림2에 히터 블록의 개략도가 나타나있다.

2.2 수조

원자로 공동내는 대기압이므로 이번 실험에서도 대기압 조건으로 test section을 설계하였다. 히터 총용량이 약 9KW 정도, 되므로 이를 고려하여 한변이 400mm인 정육면체로 설계하였다. 수조내에 물을 채웠을 때 증기에 의한 순수한 기포들의 pattern을 측정하기 위해 물을 포화상태에서 어느정도 끓여져야 져야하므로, 수조내에 Imersion heater를 설치하였다. 기포들의 흐름을 관찰하기 위해서 정육면체 각면에 관찰창을 설치하였다. 관찰창과 히터블럭의 배치를 변화시키면서 수직면, 수평면, 하향면에 대한 실험이 가능하도록 설계하였다.

2.3 복수기

실험중에 히터 총용량을 10kW로 계산했을 때 여기서 발생하는 열에 의해 생성된 증기를 응축시켜서 열을 제거하기 위해 전체 용량 300 리터의 물탱크안에 10kW용량의 열교환기를 설치하였다. 실험이 오랜시간 진행되면 열용량의 한계 다다라 test section내에 가압이 되는 것을 방지하기 위해 3Way valve를 설치 여압이 배출시킬 수 있게 설계하였다. 시간이 진행됨에 따라 열교환기 용량에 한계가 다다를 수 있기 때문에 물 온도가 올라갈 수 있다. 이때는 수조내 물을 새로히 공급시켜 주면서 유동을 줄 수 있게 했다.

3. 계측장비

실험에서는 히터블럭의 2차원적 온도 분포, 압력, 기포의 고동 등이 측정되어야 될 주요 실험인자들이다.

1개의 압력센서를 수조에 설치하였고 16개의 T type열전대와 2개의 K type 열전대를 설치하였다. 열전대는 열속 측정용으로 16개를 T type, 즉 4개의 설치용 구리봉으로 히터 블록 전면부 중심으로 세로 방향으로 3개, 가로 방향으로 1개를 설치하여 축방향과 반경방향의 균일한 열속을 측정할 수 있도록 설치하였다. 2개의 K type열전대중 1개는 물온도를 측정하기 위해, 수조내에 설치하였고 나머지 하나는 히터블럭 자체의 가장 온도가 높은 부분인 뒷부분에 설치하여 일정한 온도 이상으로 올라가지 못하도록 출력제어용으로 설치하였다.

T type열전대에 나오는 수 mV의 전압은 HP사의 VXI 데이터 수집장치에서 60Hz간격으로 셈플링해서, 온도로 변환, 저장하였다. 압력센서는 수조가 가압이 되는 것을 방지하기 위해 tranducer를 설치하여 3way valve를 개방할 수 있도록 하였다. 실제적으로 입력되는 Power를 알기 위해 HIOKI 사의 Hook meter를 사용하여 전류를 측정하고, FLUKE사의 전압측정기로 전압을 측정하여 열전대로 측정, 계산한 값과 비교하였다. 열속의 변화에 따른 기포들의 pattern을 촬영하기 위해 고속카메라를 이용 관찰창을 통해 촬영하였다.

4. 실험방법

실험은 먼저 수직면에서부터 상향면, 하향면에서 이루어 졌다. 증기에 의한 순수한 기포들에 의해서 열전달이 이루어 져야 하므로 물을 가열 포화상태로 올리고 물속에 있는 공기들을 다 빼낸 후에 실험을 시작했다. 출력은 약 0.05M에서 0.1M정도의 step으로 각 단계 별로 steady상태에서 온도를 측정하였다. 고속 카메라 촬영은 4단계로 나누어

1000frame으로 1초 정도 촬영하였다. 상향면에서 이와 같은 식으로 실험을 수행하였고, 하향면에선 0° 에선 유동이 없어 안정된 출력을 조절할 수 없었다. 그래서 약 6° 정도로 경사를 주어 실험을 수행하였다.

5. 실험 결과

가열면의 열속은 열전대로 측정한 값으로 계산하였다. 한편, 표면온도는 열전대용 설치봉에서 측정된 열속 값으로 외삽하여 구하였다.

5.1 열전달 계수

그림 3, 4, 5에 수직면, 수평면, 하향면에서의 열전달 계수가 도시되어 있다. 수직면과 수평면의 거동은 유사하였으나, 하향면의 거동은 판이하게 다른 것을 알 수 있었다. CHF가 수직면은 약 1.1MW/㎡정도 상향면은 약 1MW/㎡정도로 측정되어졌다. 최대 CHF값은 수직면에서 1.1MW/㎡로 측정되어졌는데, 이 값은 T.D. Bui and V.K.Dhir [1] 가 수직면에서 측정한 CHF값인 약 0.9MW/㎡ 보다 다소 크다. 한편 CHF에서 표면온도와 물 온도의 차이가 약20℃에서 발생한다는 것은 일치했다. 수직이나 수평이나 모두에 대해서도 약 20℃정도 차이가 나야 CHF가 발생하였다.

하향면에선 약 0.89MW/㎡정도로 측정되어져 약간의 경사라도 열전달에 큰 영향을 미친다는 알 수 있었다.

5.2 열속의 변화에 따른 기포 거동의 가시화

열속을 변화시키면서 고속 비디오 카메라를 이용하여 기포의 거동을 가시화 하였다. 어느 경우에나 가열면으로부터 폭발적으로 기포가 발생하였고, 그 거시적으로 기포의 거동이 주기적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 거시적인 거동이 열속과 가열면의 방향에 따라 판이하게 다른 것을 알 수 있었다.

그림 6에는 수직면에서의 열속의 변화에 따른 기포의 거동이 도시되어 있다. 열속이 증가하면서 가열면의 하단부에서 기포의 크기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있고, 그 최대 크기는 30 mm 정도 였다. 한편 임계 열속에 가까워지면서 기포의 크기가 다소 주는 것을 볼 수 있다. 한편 열속이 증가하면 기포의 거동이 급격히 변화하여 막 비등 영역으로 천이 되는데, 그 거동이 그림 9에 도시 되어 있다.

그림 7에는 상향 가열면에서 열속의 변화에 따른 기포의 거동이 도시되어 있다. 가열면으로부터 기포가 폭발적으로 발생하는 것을 볼 수 있다. 열속이 증가하면서 기포의 크기가 커지고, 기포의 거시적인 거동의 변화 주기가 빨라지는 것을 관찰 할 수 있었다. 가장 큰 기포의 크기가 3-4 cm 정도의 크기 인 것을 알 수 있었다.

그림 8에는 하향면에서 열속의 변화에 따른 기포 거동이 도시 되어 있다. 가열면으로부터 주기적으로 기포가 가열면의 크기보다 크게 발생하고 없어지는 과정이 되풀이 되는 것을 볼 수 있었다. 한편 열속이 임계 열속에 가까워지면 기포가 커지지 않고 기울어진 면의 윗부분으로 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 막 비등 영역에서는 기포가 커지지 않고 증기막이 가열 면 위에 형성되는 것을 알 수 있다. 그림 9-c에 막 비등에 대한 기포의 거동이 도시되어 있다.

5.3 막 비등에 대한 실험

막 비등에 대한 실험은 가열하는 경우와 식히는 경우의 열속이 아주 다르게 나타나고 정상

상태를 얻기가 아주 힘들었다. 하양 가열면 및 수직면에서 막 비등 영역에 대한 열전달 계수를 일부 측정할 수 있었다. 그림 3과 5에서 보듯이 표면의 온도가 200도 이상 이었으면 열속은 0.1 MW/㎡로 측정 되어 실험 오차 범위 부근이어서 막 비등 영역에 대한 실험 자료를 정확하게 구하기가 어려웠다.

5.4 냉각 거동

막 비등 영역에 도달하자 마자 히터의 출력을 끊고 냉각 실험을 수행하였다. 그림 10에 히터블럭의 온도 변화가 나타나 있다. 막 비등 영역과 처니 영역에 있을 때는 냉각이 서서히 되다가, 핵 비등 영역으로 옮겨지면서 히터 블록의 온도가 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다. 핵 비등 영역에서 자연 대류 영역으로 변화되면 온도가 다시 완만하게 감소되는 것을 볼 수 있다.

References:

1. T. D. Bui, V. K. Dhir, Transition Boiling Heat Transfer on a Veritcal Surface, Transactions of ASME, Vol. 107, 1985.
2. H. S. Liang, W. J. Yang, and D. L. Vrable, Feasibility Study of immersion cooling of multi-chip modules on metal-graphite composite surfaces, Proceedings of 11th IHTC, Vol.2, 521-526, 1998, Kyongju, Korea.
3. A. H. Howard, C. Gersey, An analytical model for near-saturated pool boiling critical heat flux on vertical surfaces, I. Mudawar, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 10, 2327-2339, 1997.
4. T. G. Theofanous and S. Syri, The coolability limits of a reactor pressure vessel lower head, Nuclear Engineering and Design 169, pp. 59-76, 1997.
5. 4. A hydrodynamic critical heat flux model for saturated pool boiling on a downward facing curved heating surface, F. B. Cheung, K. H. Haddad, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 6, 1291-1302, 1997.
6. S. H. Yang, W. P. Baek, S. H. Chang, Pool boiling critical heat flux of water on small plates: Effects of surface orientation and size, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 24(8), 1093-1102, 1997.

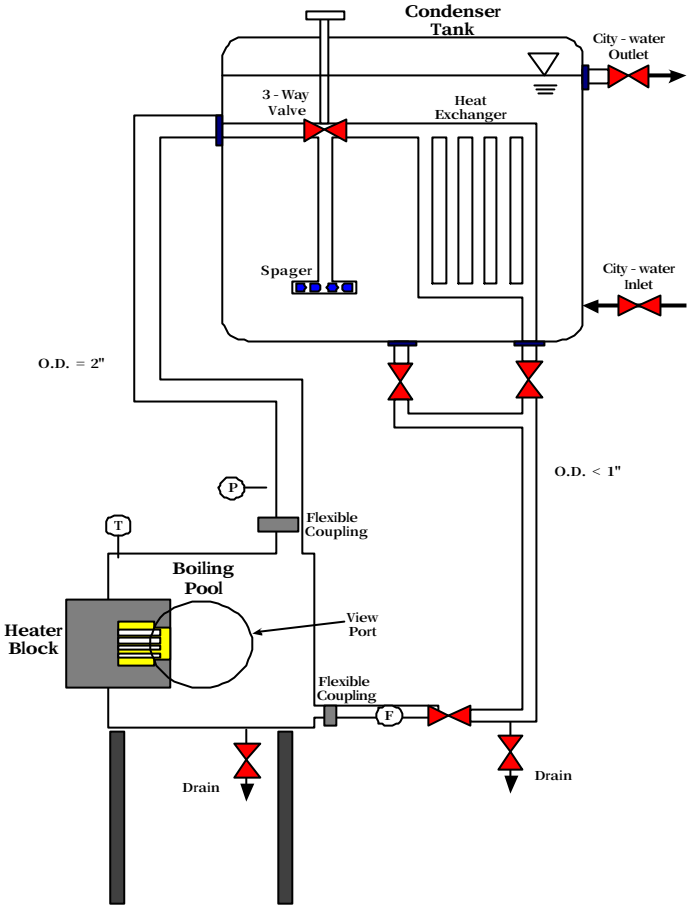

그림 1. 전체 구성도

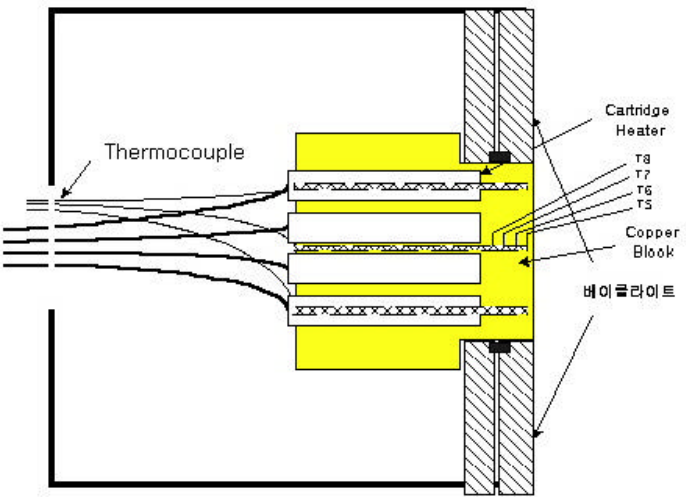

그림2. Heat Block 구성도 및 열전대 위치도

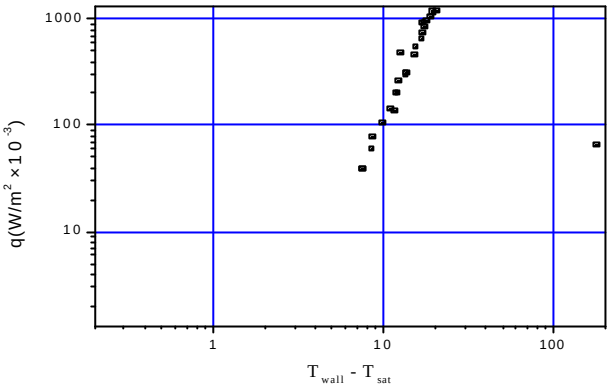

그림 3. **수직면에서의** Heat Flux

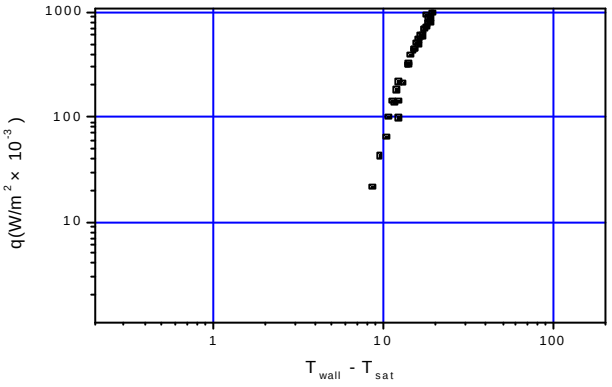

그림 4. **수평면에서의** Heat Flux

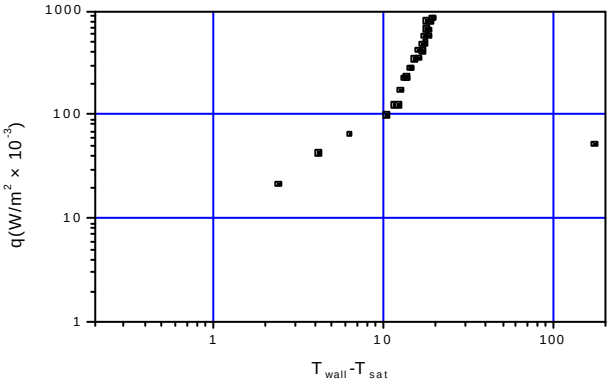

그림 5. 6° **기울인 하향면에서의** Heat Flux

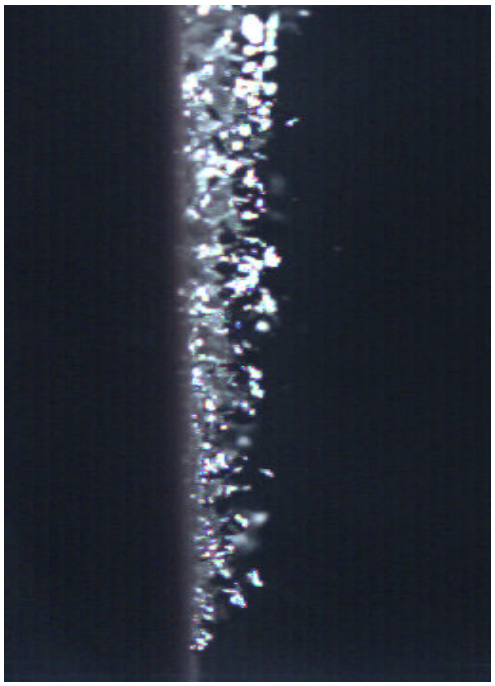

그림 6-a

그림 6-b

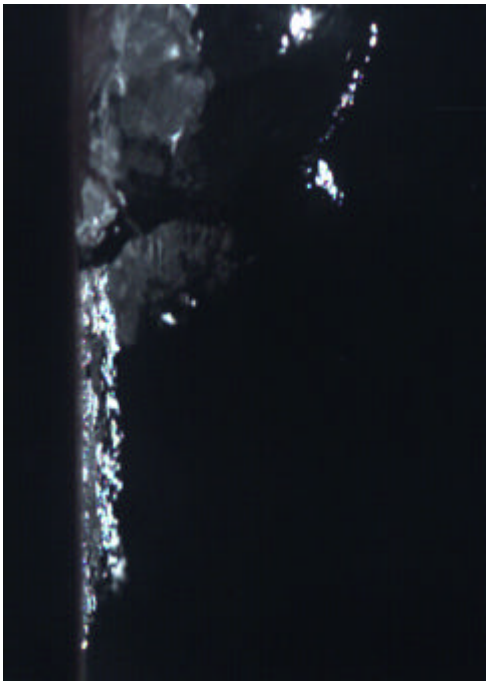

그림 6-c

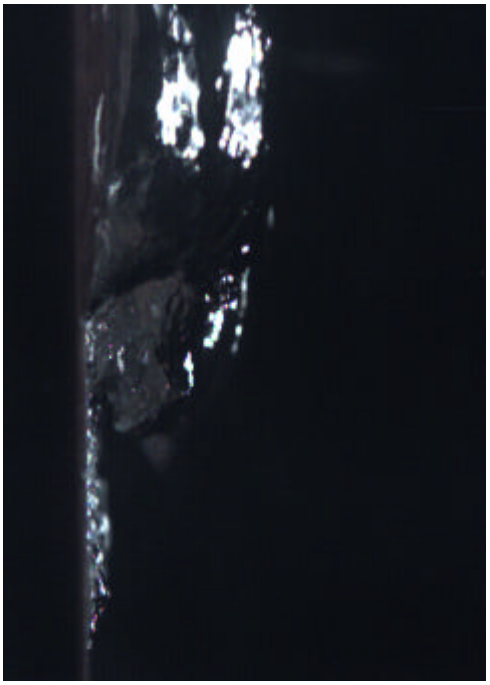

그림 6-d

그림 6. 수직판에서의 촬영(0.1(6-a), 0.3(6-b), 0.8(6-c), 1(6-d)MW/㎡)

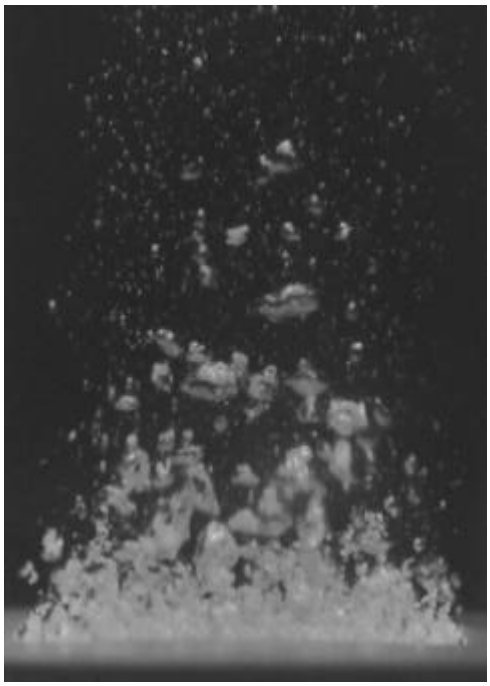

그림 7-a

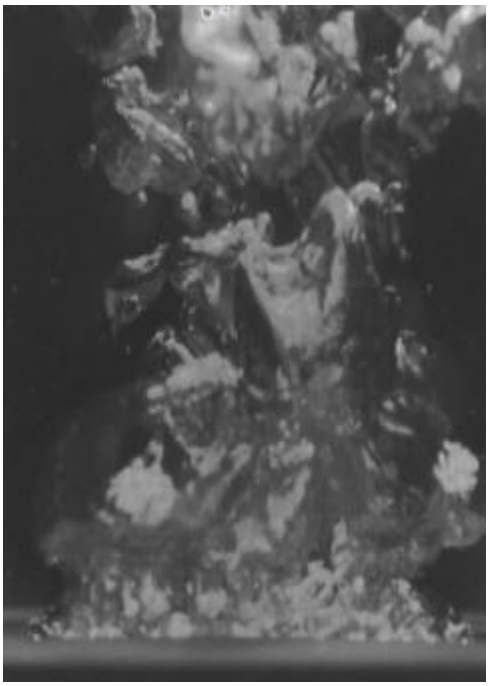

그림 7-b

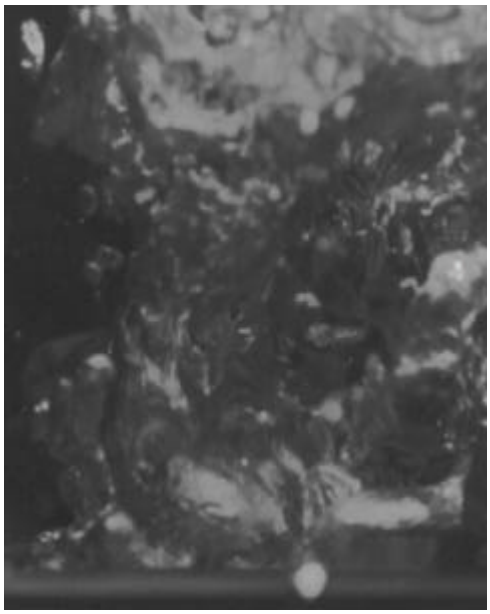

그림 7-c

그림 7-d

그림 7. 상향판에서의 촬영(0.1, 0.3, 0.8, 1MW/㎡)

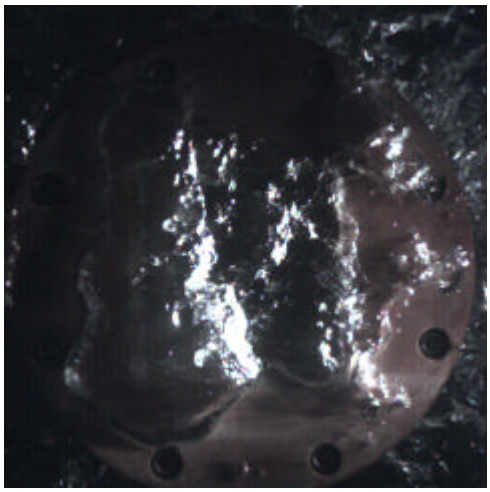

그림 8-a

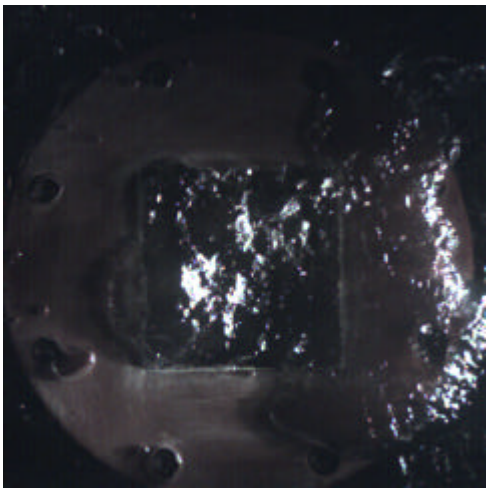

그림 8-b

그림 8. 6 ° 기울인 하향면에서의 촬영(0.6, 0.8MW/㎡)

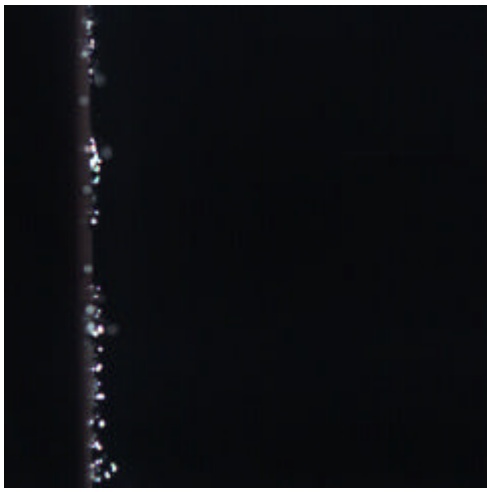

그림 9-a. 수직면(side)

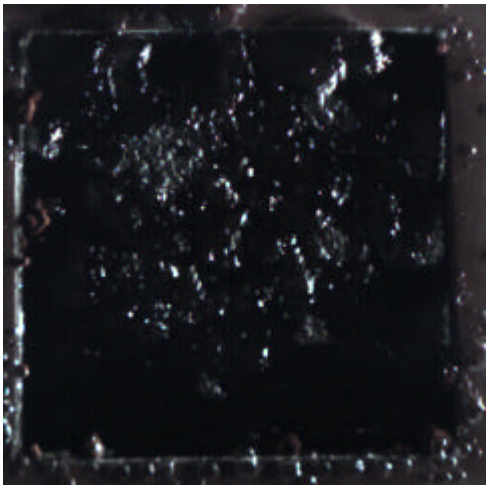

그림 9-b. 수직면(front)

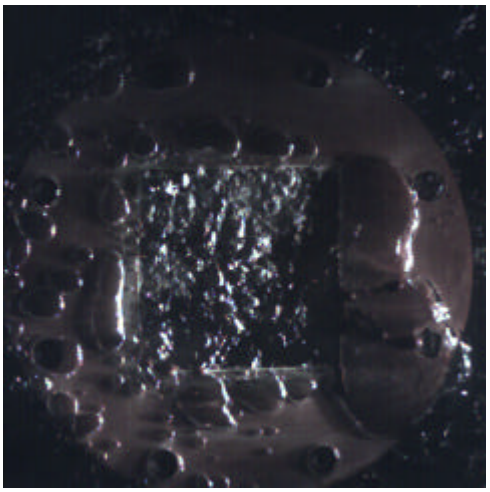

그림 9-c. 하향면

그림 9. 막비등에서의 촬영

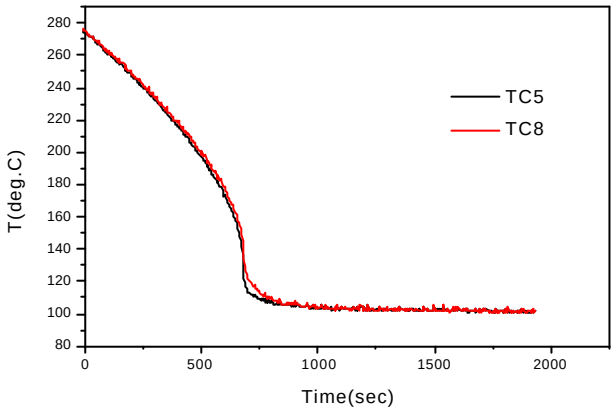

그림 10. 수직면에서의 quenching