

## 수직면에서의 비등 열전달에 대한 실험적 연구

김재광\* · 송진호\* · 김 신\* · 김상백\*\* · 김희동\*\*  
 (2001년 3월 5일 접수, 2001년 7월 10일 심사완료)

### An Experimental Investigation of the Boiling Heat Transfer on the Vertical Square Surface

Jae Kwang Kim, Jin Ho Song, Sin Kim, Sang Baik Kim and Hee Dong Kim

**Key Words:** Critical Heat Flux(임계열속), Pool Boiling(수조비등), Severe Accident (중대사고) Visualization (가시화)

#### Abstract

An experimental study was carried out to identify the various regimes of natural convective pool boiling and to determine the boiling heat transfer curve and Critical Heat Flux(CHF) on a vertical square surface having a 70 mm width and a 70 mm height. The heater made of copper block with embedded cartridge heaters is submerged in a water tank at atmospheric pressure. As the heat flux increases from 100kW/m<sup>2</sup> to 1.2MW/m<sup>2</sup>, the heat transfer regime migrates from the nucleate boiling to the film boiling. The boiling heat transfer data are fitted by Rohsenow type correlation. An explosive vapor generation on the heated surface, whose size and frequency are characterized by the heat flux, is visualized using a high speed digital imaging system.

#### 기호설명

$q''$	: 단위면적 당 열속	W/m <sup>2</sup>
$\rho$	: 밀도	kg/m <sup>3</sup>
$i$	: 단위질량당엔탈피	J/kg
$g$	: 중력가속도	m/s <sup>2</sup>
$\sigma$	: 물의 표면장력	N/m
$dx$	: 거리차	m
$dT$	: 온도차	°C
$T_w$	: 표면온도	°C
$T_{sat}$	: 포화온도	°C
$T_{measured}$	: 열전대측정 온도값	°C

$k$	: 열전도 계수	W/mK
$C_P$	: 비열	J/kgK
$\mu$	: 점도	N·s/m <sup>2</sup>
하첨자		
$f$	: 액체	
$g$	: 기체	
$fg$	: 기체와 액체간의 각종 상태량 차이	

#### 1. 서 론

수조비등(pool boiling) 열전달은 가열면의 온도를 그다지 상승시키지 않고 많은 열을 전달할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가열면에 공급되는 열속이 임계 열속(critical heat flux) 보다 커지면 열

\* 회원, 제주대학교 에너지공학과  
 \*\* 회원, 한국 원자력연구소  
 † 책임저자, 회원, 원자력연구소  
 E-mail : dosa@kaeri.re.kr  
 TEL : (042)868-2850 FAX : (042)861-2574

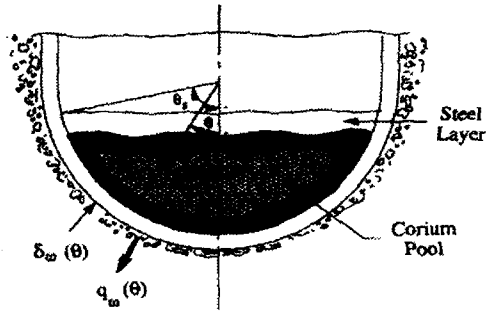


Fig. 1 Configuration for the In-Vessel Retention

전달 거동이 핵비등으로부터 막비등으로 변화하고 가열면이 급속히 가열되면서 파손될 수 있으므로 열속 부하를 임계열속 이하로 유지시켜야 한다. 수조비등 열전달은 액체상태의 프로판, 부탄등과 같은 위험한 화학물질을 안전하게 저장하는데<sup>(1)</sup> 이용되거나, 고속 집적회로의 냉각 및 초소형 열 교환기<sup>(2)</sup> 등에 활발하게 이용되고 있다.

최근에는 원자로의 중대사고시 원자로 외벽냉각과 관련된 수조비등 현상이 새롭게 조명되고 있다. 원자로에서 노심용융사고가 발생하게 되면 노심의 핵연료가 녹아 내려서 원자로 하반구에 쌓이게 된다. 녹은 핵연료에서 붕괴열에 의해 지속적으로 열이 발생되므로 원자로 용기가 파손될 수 있으며 이로 인해, 핵연료 및 방사능 물질이 외부에 누출될 수 있다. 최근에 이러한 사고를 완화하기 위하여 원자로 공동에 물을 공급하여 원자로 외벽을 냉각하는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다.<sup>(3)</sup> 원자로 용기의 외벽이 반구형이므로 이를 이차원적으로<sup>(3)</sup> 또는 수평면으로 단순화하거나,<sup>(4)</sup> 규모가 작은 반구형태로 모사하여 연구가 수행되었다.<sup>(5)</sup> 이러한 실험적인 연구에서 얻어진 결론은 외벽 냉각에서의 열적여유도(thermal margin)가 수직면에서의 비등 열전달 및 임계 열속에 의해 지배받는다는 것이다.

수직면에서의 비등 열전달에 대한 종전의 실험적 연구들을 살펴보면, 높은 열속을 다루어야 하는 어려움 때문에 비교적 단순화된 경우에 대한 실험이 제한적으로 수행된 것을 알 수 있다. Wire heater를 사용하여 열속에 따른 기포거동을 관찰하거나,<sup>(6)</sup> 물보다 비등점이 낮은 프레온을 사용하여 압력영향에 따른 임계 열속 값을 실험적으로 구하기도 한다.<sup>(7)</sup> Dhir 등<sup>(8)</sup>은 가로, 세로 6.3 cm, 10.3 cm의 수직 가열면을 사용하여 급냉 방

식(quenching method)으로 임계 열속을 측정하였는데 그 값은 약 0.7 MW/m<sup>2</sup> - 0.9 MW/m<sup>2</sup> 범위였다. 최근 Yang 등<sup>(4)</sup>은 가열면의 종횡비를 달리하여 가열면 직접가열 방식(direct heating method)으로 실험하여 약 1.1 MW/m<sup>2</sup>의 임계 열속을 측정하였다.

한편, 기포거동의 가시화는 핵비등에서의 열전달 거동을 이해하는데 많은 도움이 되어왔다. Nishikawa 등<sup>(9)</sup>은 가로, 세로 길이 4.2 cm, 17.5 cm인 수직 가열면을 사용하여 0.7 MW/m<sup>2</sup> 이하의 낮은 열속에서 기포거동을 가시화하였다. 그리고 Galloway & Mudawar<sup>(10)</sup>는 한 변이 1 cm인 히터를 사용하여 유동비등(flow boiling)에서 최대 2 m/s까지의 유속을 주어 1 mm 이내의 기포거동을 국부적으로 관찰하였다. Bae<sup>(11)</sup> 등은 이성분 물질의 비등 열전달을 연구하기 위해 가시화 연구를 수행하였다.

중대사고시 외벽냉각 등은 해석하기 위해서는 임계 열속 부근까지의 수조비등 상관식이 필요하게 되는데, 이를 구하기 위해 본 실험이 수행되었다. 즉 Dhir<sup>(8)</sup>의 실험과 달리 정상상태 가열 실험이 필요하며, 열전달 거동을 규명하기 위해서는 Nishikawa<sup>(9)</sup>의 연구를 확장하여 임계 열속까지의 가시화 연구를 수행하고자 한다. Yang,<sup>(4)</sup> Dhir,<sup>(8)</sup> Nishikawa<sup>(9)</sup> 등은 직사각형 가열면을 사용하였는데, 원자로 외벽과 같이 아주 큰 표면의 조건은 정사각형 형태의 가열면을 사용하는 것이 원형의 조건에 더 가까운 것으로 판단되어 본 실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

전체 실험장치는 Fig. 2에 나타나 있는 것처럼, 히터블럭(heater block), 히터블럭이 들어있는 수조(test section), 복수기로 이루어 졌다. Test section에는 가열면(heating surface)을 측면과 정면에서 관찰할 수 있는 창이 설치되어 있다. 히터블럭은 재질이 99% 구리인 원통형 구리블럭(copper block)을 가공하여, 앞부분은 정사각형 단면을 가지는 기둥 모양으로, 뒷부분은 원통형으로 가공하였다(Fig. 3참조). 따라서 가열 면은 한 변이 70mm인 정사각형이 되었다. 봉 형상을 가진 16개의 Cartridge heater (Watlow사, 모델명: KEBG 0080 C005A, 600W)를 원통형 구리 블럭의 뒷부

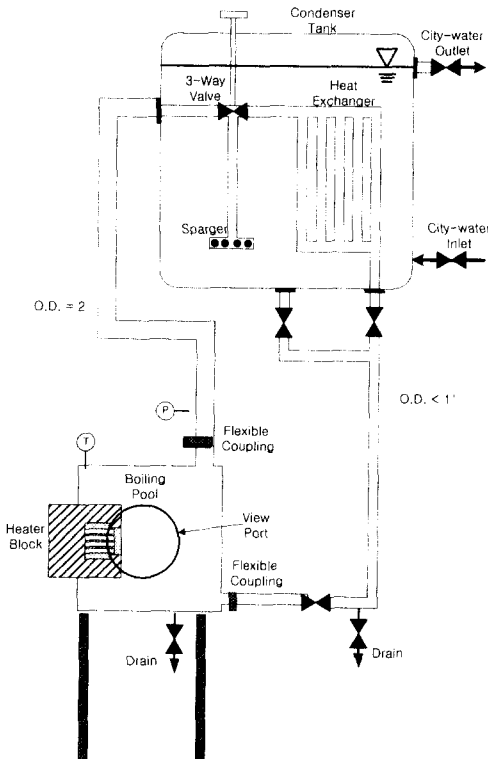


Fig. 2 Schematic diagram of the test facility

분에 설치하여, 가열 면에 균일한 열속을 낼 수 있도록 하였다. Fig. 3에 보인 것처럼, 열전대는 열속 및 표면온도를 측정하기 위해, 가열면 표면 4 군데에, 표면으로부터 깊이방향으로 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm 지점에 설치하였다. 총 16 개의 직경 0.5mm인 열 전대 (T-type, ungrounded junction type, 허용오차  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ )를 사용하였다. 직경 3 mm 인 4 개의 구리봉을 사용하고 각각의 구리 봉마다 4 개의 열전대를 장착하였다.

Test loop은 폐쇄회로(closed loop)로 구성되어 있으며 실험조건은 대기압, 포화상태이다. 수조크기는 9.6 kW 의 히터 용량으로 충분하게 물의 포화온도를 유지할 수 있게 한 번이 400 mm 인 정육면체(총 물의 질량: 64 kg)로 설계하였다. 포화온도를 유지하기 위해 Immersion heater(2 kW, 220 V)를 사용하여 간헐적인 가열을 하였다. 가시화를 위해 정육면체 각 면에 두께가 10 mm 인 Poly-carbonate 관찰 창을 설치하였다.

복수기는 300 리터의 물탱크를 사용하여 수조

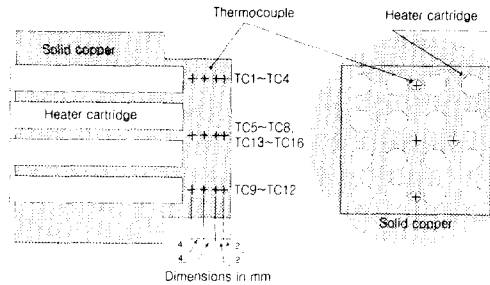


Fig. 3 Heater block and the thermocouples

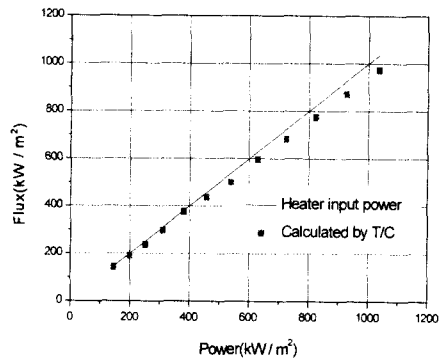


Fig. 4 The input power and the heat flux dissipated on the heater surface

형태로 설계하였다. 실험 중에 발생하는 기화열을 효과적으로 복수기로 전달하기 위해 열 교환기 튜브를 설치하였다. 이때 열 교환용 튜브는 직경이 1 인치이고, 길이 25 cm 인 구리파이프 8 개를 연결하여 제작하였다. 제거할 수 있는 최대 열용량이 초과되면 복수기내의 물 온도는 상승하고, Test section내부가 가압 될 수 있으므로, 3 Way valve를 사용하여 증기를 배출할 수 있도록 하였다.

비응축성 가스의 영향을 없애고, 대기압에서의 포화조건을 만들기 위해, 작동유체인 물을 충분히 가열하여 실험조건을 만들었다. 실험은 0.05 MW/m<sup>2</sup> 에서 시작해서 출력을 증가시키면서, 특정한 출력 (0.1, 0.3, 0.8, 1.0 MW/m<sup>2</sup>)에서 정상상태로 5분 이상 유지시킨 후 실험자료를 측정하였다. 각 정상상태 에서 고속촬영(Phantom V4.0 high speed digital imaging system)을 하여 기포거

동을 가시화 하였다. 이때 일반 디지털 캠코더 (SONY, DCR- TRV900)를 사용하여 정면촬영을 병행하였다. 출력제어는 SCR방식을 사용하였다.

히터에 공급되는 출력은 전압계(FLUKE787)와 전류계(HIOKI3282)를 통해서 측정하였다. 이렇게 측정된 출력과 열전대를 사용하여 계산한 값을 비교하여 손실되는 열속의 양을 측정하였다 (Fig. 4참조). 이때 출력이 증가하면서 열손실이 발생하는데, 약  $0.7 \text{ MW/m}^2$  이상에서 약 10 % 이내의 열손실이 발생하였다. 열전대 등의 모든 계측장비에서 나오는 신호는 HP VXI 데이터 수집장치 (data acquisition system E1401B)에 60 Hz 간격으로 저장되었다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 열속

주어진 히터 출력 조건에서 정상상태에 도달한 후 열속 및 표면 온도를 측정하였다. 정상 상태에 도달한 여부는, 계측된 온도의 편차가 T-type 열전대의 오차범위인 약 1 K 이내로 5분 이상 유지되는지에 따라 결정하였다. 열속은 히터 블록에서의 축 방향의 온도분포를 열전대로 측정한 후, 다음과 같이 일차원 열전도 방정식을 사용하여 계산하였다.

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

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

여기서,  $k$ 는 400 K 에서의 구리 전도도이고, 표면에서 2 mm 지점의 열전대와 표면에서 12 mm 지점에서의 거리와 온도를 이용하여 구하였다. 표면 온도는 구하여진 열속을 사용하여, 표면에서 2mm 지점의 열전대에서 측정된 온도를 외삽하여 구하였다.

가열면에서 위치의 변화에 따른 열속은 균일하게 유지되다가 열속이 증가함에 따라 편차를 보이는데, 그 결과가 Fig. 5에 도시되었다. 약  $0.7 \text{ MW/m}^2$  이상에서 열속에서 위치별로 열속 편차가 두드러진다. 가열면의 하단부에 위치한 열전대 열(T9 ~ T12)에서 가장 열속이 낮았고, 중심에서 오른쪽에 위치한 열전대 열(T13 ~ T16)에서 열속이 가장 높았다. 이하 3.3 절에 설명되듯이 출력

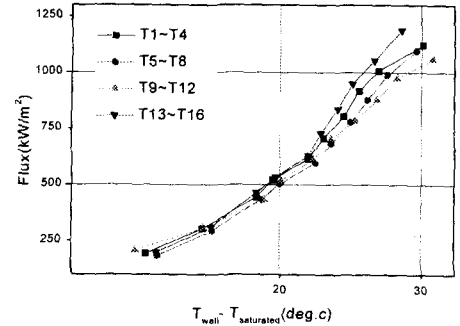


Fig. 5 Heat fluxes at various positions

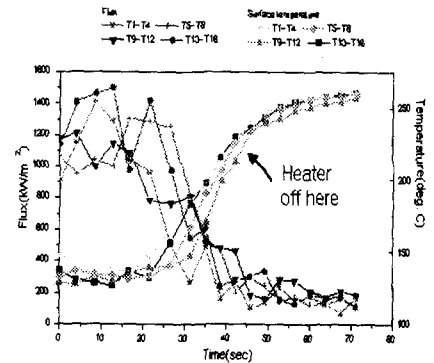


Fig. 6 Transient heat flux and surface temperature on the heating surface

이 증가하면서 위치별로 열속 편차가 발생하는 것은 기포거동과 밀접한 관련이 있다.

임계열속 부근에서의 거동은 용이하게 구별되었다. 히터의 출력이  $1.15 \text{ MW/m}^2$  이하에서는 히터 표면에서의 열속이 정상 상태에 도달하였다. 그러나, 약  $1.22 \text{ MW/m}^2$ 로 히터 출력을 증가시키자 히터 표면에서의 열속의 변화가 심하게 발생되었다. Figure 6에서 보이는 것처럼 약  $0.9 - 1.4 \text{ MW/m}^2$  범위로 출력이 불안정되게 유지되다가 급격히 열속이  $0.2 \text{ MW/m}^2$  이하로 감소하였다. 이 과정 중에 열전달 모드가 핵비등 열전달에서 막비등 열전달로 바뀌게 되었다. 히터의 출력은 일정하게 유지되는데, 히터표면에서의 열전달이 급

격히 감소되므로 히터 표면의 온도가 급상승하였다. 히터의 손상을 방지하기 위해 출력을 차단하였다. 이 과정 중 표면온도는 3K/s의 상승을 보였다.

대체로 약 1.1 MW/m<sup>2</sup> 이상에서 임계 열속이 발생하였는데, 이 열속은 Bui and Dhir<sup>(8)</sup>의 측정치(약 0.7에서 0.8 MW/m<sup>2</sup>)와 많은 차이를 보인다. 그 이유는 급냉방식에 의해 실험을 수행하면, 정상 상태에서 수행된 실험 보다 낮은 임계 열속이 관찰되기 때문이며, 최근에 Yang 등<sup>(4)</sup>이 종횡비(aspect ratio)가 2인 직사각형 가열면의 실험에서 1.1 MW/M<sup>2</sup>의 임계 열속이 얻어진 것이 본 실험 결과의 타당성을 반증하고 있다.

임계 열속 근처에서의 압력은 Fig. 7에서 보여지는 것처럼, 막비등으로 천이되면서 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있었다.

3.2 열전달 상관식

열전달 계수는 표면 열속 뿐만 아니라, 표면의 거칠기등 표면의 상태에도 영향을 받는다. 본 연구에서는 표면 상태와 액체와의 영향을 고려한 Rohsenow 상관식<sup>(12)</sup>을 사용하여 실험자료를 평가하였다.

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

여기서, C<sub>sf</sub>는 특정 액체-고체표면 조합의 영향을 대변하는 상수이다. m은 넓은 압력범위의 여러 액체에 대해 0.33 이고, n은 물인 경우, 1 이 권고된다<sup>(12)</sup>. 이 관계식을 사용하여 실험자료를 fitting하였다 (Figure 8 참고). C<sub>sf</sub> 값이 0.0027로 얻어졌다. 이 결과는 0.7 MW/m<sup>2</sup> 이하의 낮은 열속에서 수직 가열면 실험을 한 Nishikawa 등<sup>(10)</sup>의 경우에서 얻어진 0.003과 유사하여 실험자료의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

3.3 열속변화에 따른 기포거동의 가시화

고속 비디오 카메라를 이용하여 열속 변화에 따른 기포거동을 가시화 하였다. 입체적인 관찰을 위해, 일반 디지털 캠코더를 사용하여 정면 촬영을 병행하였다. 기포거동이 크게 Isolated bubble layer 와 Wavy bubble layer 로 나뉘는 것을 관찰할 수 있었다.

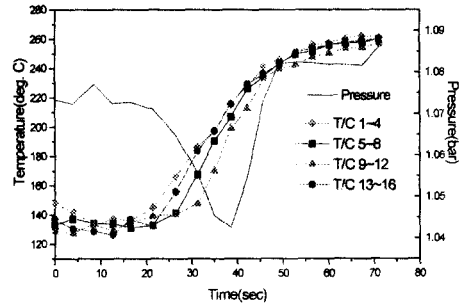


Fig. 7 Pressure and temperature variation near CHF

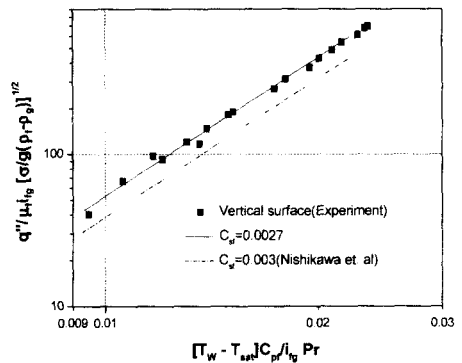


Fig. 8 Comparison of other experiments<sup>(12)</sup>

3.3.1 Isolated bubble layer

히터 출력이 약 0.2 MW/m<sup>2</sup> 까지 초기상태의 기포거동이 Fig. 9에 도시 되어있다. 가열면의 표면상태에 따라 차이가 있겠지만, Fig. 9에서 보듯이, 크기가 대략 5~6mm 인 기포들이 뭉쳐짐이 없이 유동을 따라 이동한다.

3.3.2 Wavy bubble layer

열속이 약 0.3 MW/m<sup>2</sup> 이상으로 증가하면서 가열면 표면에서 충분히 커진 기포들은 물결모양(wavy pattern)의 형태로 생성, 성장 및 이탈하는 주기적인 양상을 보인다. 열속이 0.3 MW/m<sup>2</sup> 인 경우에는, Fig. 10(c)에서 보듯이, 기포가 가장 많이 성장하였을 때, 타원형의 형태로 약 5 개의

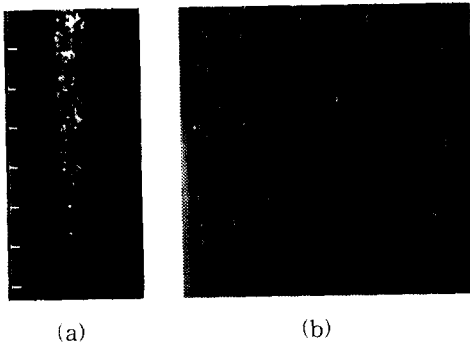


Fig. 9 The side (a) and front (b) view of isolated bubbles on the vertical surface

기포가 생성되어 가열 면을 덮게 된다. 크기는 가열면의 선단 부에서는 길이 10 mm, 높이 5 mm 의 크기였다가, 하류방향으로 갈수록 길이 약 20 mm 높이 20 mm로 증가한다. 1000 fps로 고속촬영 결과, 주기적인 거동의 주기가 약 73/1000 sec 로 관찰되었다.

열속이 약 0.8 MW/m<sup>2</sup> 이 되면, 기포거동은 여전히 Wavy bubble layer이지만, 생성 속도는 좀더 빨라지고 기포의 크기도 커진다. 이러한 거동이 Fig. 11에 나타나 있다. 생성되는 형태는 변화가 없지만, 성장과정에서 기포들이 2 개 정도의 큰 기포로 뭉쳐진다. 전체적으로 타원형의 형태를 보인다. 2 개의 기포가 전체 가열 면을 덮고 있고 크기는 대략 높이가 30 mm 이다. 0.8 MW/m<sup>2</sup> 에서 고속 촬영한 결과, 생성속도는 좀 더 빨라져 약 63/1000 sec 로 측정됐다.

출력이 임계 열속에 가까워지면서 기포생성 속도는 더 빨라진다. 약 1.0 MW/m<sup>2</sup> 에서, 기포거동은 여전히 주기적인 경향을 보이지만, 임계 열속 근처이므로, 기포들이 가열 면 근처에서 모두 뭉쳐져서, 마치 하나의 기포가 생성되고 빠져나가는 것처럼 보인다. 기포는 유동방향에 따라 타원형 형태로 형성된다. 생성된 기포는 성장하면서 가열면 전체를 덮을 정도로 커지는데 이때의 높이는 30 mm로 0.8 MW/m<sup>2</sup> 와 비슷한 크기를 보인다. 이 때의 생성속도는 약 50/1000 sec 로 빨라진 것을 알 수 있다(Fig. 12 참조).

위의 거동을 종합해 보면 선단부에서와 하류의 기포 거동이 다르며, 좌우 대칭으로 일정한 형태의 기포가 발생하므로 가열면의 위치에 따라 열

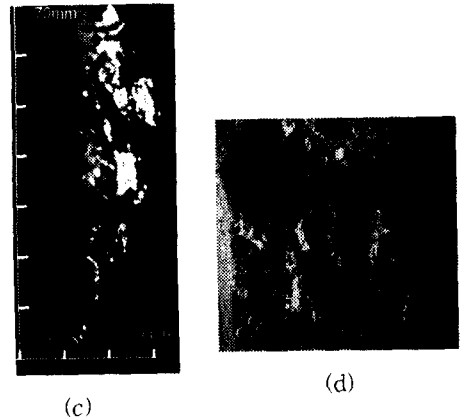
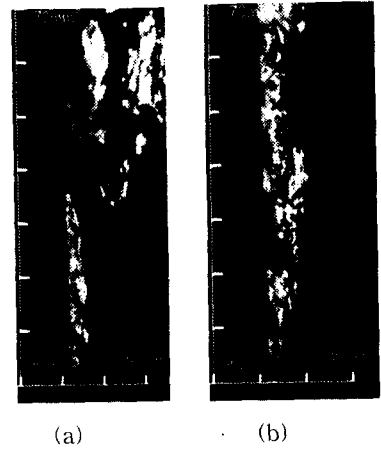


Fig. 10 The wavy bubbles on the vertical surface at about 0.3 MW/m<sup>2</sup> ((a) → (b) → (c) → (a)). (d) is front view of (c)

속이 균일하지 않은 Fig. 5의 실험결과가 설명될 수 있다.

### 3.4 냉각 거동

Input power를 약 1.2 MW/m<sup>2</sup>로 증가시키자, 약 70 초 동안 열속, 표면온도, 압력은 심한 변화를 보이면서, 막비등 영역으로 천이되었고, 이때 출력을 차단한 상태에서 냉각거동을 관찰하였다.

일단, 막비등 영역으로 천이된 이후에는 일정한 시간동안 막비등 영역을 유지하다가 핵 비등으로 천이된다. 막비등 영역에서의 기포들은, 냉각되는 동안 일정시간 표면에 붙어있어 열전달을 방해한다. 그러므로 Fig. 13에서 보이듯이 막비등

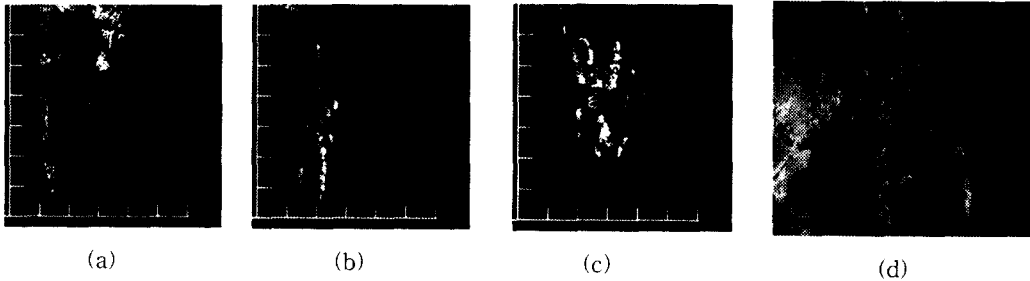


Fig. 11 The wavy bubbles on the vertical surface at about  $0.8 \text{ MW/m}^2$  ((a)→(b)→(c)→(a)) and the (d) is front view of (c)

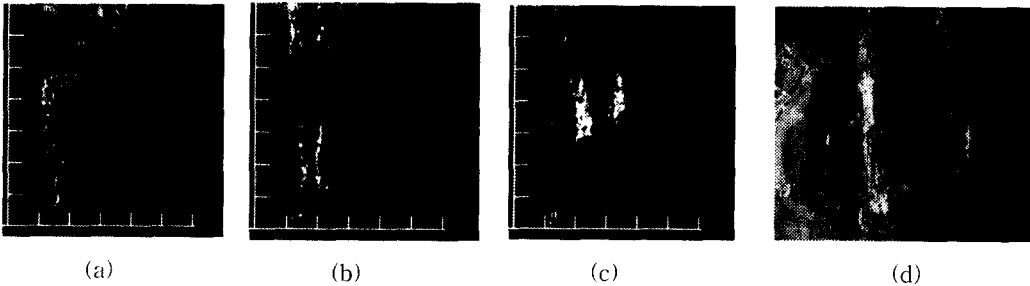


Fig. 12 The wavy bubbles on the vertical surface at about  $1.0 \text{ MW/m}^2$  ((a)→(b)→(c)→(a)) and the (d) is front view of (c)

영역에서는 약  $0.1 \text{ MW/m}^2$  이하의 열속이 유지된다. 수조 내 유동에 따라 전체적으로 가열면 중심 부근에서의 열속이 약  $142 \text{ kW/m}^2$  로 가장 높았고, 가열면 상단부분이 약  $62 \text{ kW/m}^2$ 로 가장 낮았다. 이것으로 보아 중심부에서 유동이 더 잘 일어나서 열전달에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 초기에 표면온도는 약  $0.1 \text{ K/s}$  의 비율로 냉각되다가, 시간이 지날수록 냉각율은 점차적으로 커진다. 약  $500 \text{ sec}$  근처에선 냉각곡선이 거의 수직 하강을 보이면서 핵비등 영역으로 천이된다. 냉각되는 과정에서의 압력변화와 냉각 거동이 Fig. 14에 같이 도시되어 있다. 압력은 막비등 영역에서 심한 변화를 보이다가, 핵비등 영역으로 완전히 천이가 되면 압력은 그다지 변화하지 않는다.

#### 4. 요약 및 결론

대기압 조건에서 수직 가열면에서의 수조비등에 대해 임계 열속 및 열전달 계수를 측정하고

기포거동을 물리적으로 관찰한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

열전달 자료를 Rohsenow 상관식을 이용하여 fitting 할 수 있었다. (열속과 과열도의 관계, Fig. 8 참고). 기존에 수행된 낮은 출력에서의 실험인 Nishikawa의 실험자료와 비교한 바 일치하여서, 측정된 실험자료의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

고속 디지털 카메라를 이용한 가시화를 수행하여, 기포 거동이 크게 Isolated bubble layer와 Wavy bubble layer로 나뉘는 것을 관찰하였다.  $0.3 \text{ MW/m}^2$  이하에서의 기포 거동은 Isolated bubble layer로 구별될 수 있는데, 이 때에는 기포들이 서로 뭉쳐짐 없이 가열면 근처의 유동에 따라 이동하였다. 그 이상에서의 열속에서는 Wavy bubble layer가 관찰된다. 이 영역에서는 기포들이 뭉쳐지면서 생성, 성장, 이탈의 과정이 반복되는 주기적인 양상을 보인다. 출력이 증가할수록 기포거동 순환 주기는 빨라지는 것을 관찰할 수 있었다.

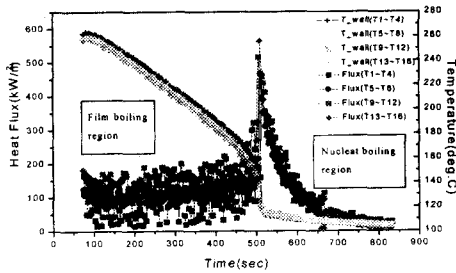


Fig. 13 Heat flux and wall temperature variation

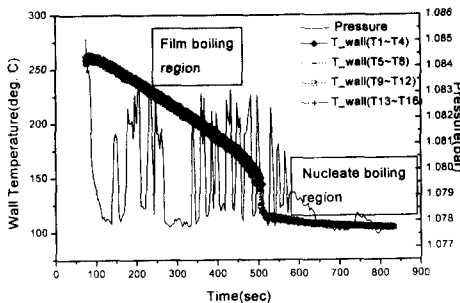


Fig. 14 Pressure variation as wall temperature decreases

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 증장기 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) Yoon, H. J. and Suh, K. Y., 2000, "Two-dimensional Analysis for the External Vessel Cooling Experiment," *Journal of Korean Nuclear Society*, 32(4), p. 140..  
 (4) Yang, S. H., Baek, W. P., Chang, S. H., 1997, "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), pp. 1093~1102.  
 (5) Chung, F. B., Haddad, K. H., 1997, "A Hydrodynamic Critical Heat Flux Model for Saturated Pool Boiling on A Downward Facing Curved Heating surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 6, pp. 1291~1302.  
 (6) Pitts, C. C. and Leppert, G., 1966, "The Critical Heat Flux for Electrically Heated Wires in Saturated Pool Boiling," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 9, pp. 365~377.  
 (7) Hesse, G., 1973, "Heat Transfer in Nucleate Boiling, Maximum Heat Flux and Transition Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 1611~1627.  
 (8) Bui, T. D. and Dhir, V. K., 1985, "Transition Boiling Heat Transfer on A Vertical Surface," *Transactions of ASME*, Vol. 107, pp. 756~763.  
 (9) 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.  
 (10) 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.  
 (11) Bae, S. W., Kim M. H., Lee, H. C., 2000, "Wall Heat Flux Behavior of Nucleate Pool Boiling under a Constant Temperature Condition in a Binary Mixture System," *Journal of KSME B*, 24(9), pp. 1239~1246.  
 (12) Rohsenow, W. M., 1973, *Boiling in Hand Book of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York, pp. 13~28.