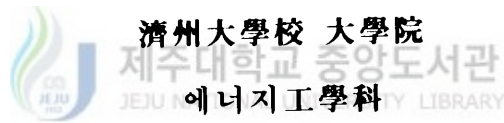


碩士學位論文

사각 平面에서의 수조 沸騰에 對한  
實驗的 研究



金 載 廣

110 479

2000年 12月

# 사각 平面에서의 수조 沸騰에 對한 實驗的 研究

指導教授 朴 在 雨

金 載 廣

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金載廣의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 千 院 基

委 員 朴 在 雨

委 員 宋 鎮 鎬



濟州大學校 大學院

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

**Jae-Kwang Kim**

**(Supervised by Professor Jae-Woo Park)**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF  
ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY  
ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

**2000. 12.**

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	v
NOMENCLATURE .....	vi
SUMMARY .....	vii
I. 서 론 .....	1
1. 연구배경 및 목적 .....	1
II. 실험 개요 .....	4
1. 실험 장치 설명 .....	4
1.1 히터블럭 .....	4
1.2 수조 .....	9
1.3 복수기 .....	9
2. 계측장비 .....	10
3. 실험방법 .....	11
III. 실험 결과 .....	13
1. 열전달 .....	14
1.1. 핵비등 .....	14
1.2 막비등 .....	17
1.3. 압력거동 .....	18
1.4. 상관식 비교 .....	19
2. 열속 변화에 따른 기포 거동의 가시화 .....	22
2.1 핵비등 .....	22
2.1.1. 상향면 .....	22

2.1.2. 수직면 .....	29
2.1.3. 하향면 .....	35
2.2. 막비등 .....	38
3. 냉각거동 .....	41
IV. 결론 및 향후 과제 .....	44
V. 참 고 문 헌 .....	46
APPENDIX .....	50



# LIST OF FIGURES

Fig.1. Schematic of the in-vessel retention phenomenology .....	3
Fig.2. Schematic of test facility .....	7
Fig.3. Schematic of heater block .....	8
Fig.4. Power to flux .....	13
Fig.5. Heat flux of the upward plate .....	15
Fig.6. Heat flux of the vertical plate .....	15
Fig.7. Heat flux of the 6° inclined downward plate .....	16
Fig.8. Comparison of the heat flux with Nishikawa et.al .....	16
Fig.9. Temperature jump of the vertical plate .....	17
Fig.10. Temperature jump of the 6° inclined downward plate .....	18
Fig.11. Pressure variation of the vertical plate .....	19
Fig.12. Pressure variation of the 6° inclined downward plate .....	19
Fig.13. Data fit of experiments with Rohsenow correlation( $C_{sf}$ ) .....	21
Fig.14. Comparison of other experiments .....	21
Fig.15. The isolated bubbles in the upward plate at 0.1MW/m' .....	23
Fig.16. The coalescent bubbles in the upward plate at 0.3MW/m' .....	25
Fig.17. The coalescent bubbles in the upward plate at 0.8MW/m' .....	26
Fig.18. The mushroom-like bubble in the upward plate at 1.0MW/m' .....	28
Fig.19. The side(a) and font(b) view of the isolated bubbles in the vertical plate at 0.1MW/m' .....	30
Fig.20. The wavy bubbles in the vertical plate at 0.3MW/m' .....	31
Fig.21. The wavy bubbles in the vertical plate at 0.8MW/m' .....	33
Fig.22. The wavy bubbles in the vertical plate at 1.0M/m' .....	34

Fig.23. The elongated bubbles in the 6° inclined downward plate at 0.5MW/m' (flow: ►) .....	36
Fig.24. The elongated bubbles in the 6° inclined downward plate at 0.8M/m' (flow: ►) .....	37
Fig.25. The film boiling of the vertical plate .....	39
Fig.26. The film boiling of the 6° inclined downward plate (flow: ►) .....	40
Fig.27. Cooling curve of the vertical plate .....	42
Fig.28. Cooling curve of the 6° inclined downward plate .....	42
Fig.29. Comparison of the cooling curves .....	43



# LIST OF TABLES

Table.1. Experiment matrix .....	12
Table.2. Rohsenow correlation with $m=0.33$ .....	20
Table.3. The result of bubbles' visualization .....	45





# NOMENCLATURE

$q_{CHF}$	임계 열속	$W/m^2$	
$q''$	단위 면적당 열속	$W/m^2$	<u>하첨자</u>
$\rho$	밀도	$kg/m^3$	f 액체
$i$	단위 질량당 엔탈피	$J/kg$	g 기체
$g$	중력 가속도	$m/s^2$	fg 기체와 액체간의 각종 상태량 차이
$\sigma$	물의 표면 장력	$N/m$	
$\lambda_T$	Taylor length scale	m	
$k$	열전도 계수	$W/mK$	
$dx$	거리차	m	
$dT$	온도차	$^{\circ}C$	
$T_w$	표면 온도	$^{\circ}C$	
$T_{measured}$	열전대로 측정된 온도값	$^{\circ}C$	
$T_{sat}$	포화 온도	$^{\circ}C$	
$\mu$	점도	$N \cdot s/m^2$	
$C_p$	비열	$J/kg$	
Frame #	프레임 수	-	

## SUMMARY

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 70mm x 70mm and the maximum heat flux capacity is about  $1.8\text{MW/m}^2$ . 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  $100\text{kW/m}^2$  to  $1.0\text{MW/m}^2$ , the heat-transfer regime changes from the nucleate boiling to the CHF. Near  $1.0\text{MW/m}^2$ , 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 1000fps. An explosive vapor generation on the heated surface, whose size and frequency are characterized by the heat flux and inclination angle, is observed.

# I. 서 론

## 1. 연구배경 및 목적

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 핵비등(Nucleate boiling)으로부터 막비등(Film boiling)으로 변화하고 가열면이 급속히 가열되면서 파손될 수 있으므로 출력을 임계 열속 이하로 유지시키는 것이 매우 중요하다. 수조비등에서의 임계 열속에 대한 연구는 Nukiyama등(1934)이 wire heater를 사용하여 실험하였고, Hesse(1972)는 프레온을 사용하여 압력영향에 따른 임계 열속 값을 실험적으로 구하였다. 또한 임계 열속 근처에서의 기포의 이론적 모델 등도 연구되었다(Chi-yeh and Peter Griffith, 1965). Dhir등(1985)은 수직 사각 가열면에서의 열전달 실험을 하였다. 이러한 고전적인 연구를 비롯하여 최근에는 고속 집적회로의 냉각 및 초소형 열 교환기에의 응용(Liang등, 1998), 프로판, 부탄 등과 같은 위험한 화학물질을 다루는 분야에도 이용되어지고 있다(Jung, 1987). 또한 원자로의 중대사고시 원자로 외벽 냉각(Theofanous등, 1994) 등에 관심이 기울어지면서 새롭게 조명되고 있다.

중대사고시에는 노심의 핵연료가 녹아 내려서 원자로 하반구에 쌓이게 된다(Fig.1 참조). 녹은 핵연료에서 붕괴열에 의해 지속적으로 열이 발생되므로 원자로 용기가 파손될 수 있으며 핵연료 및 방사능 물질이 외부에 누출될 수 있다. 따라서 중대사고 완화 측면에서 매우 중요하다. 최근에 중대사고 완화 방안의 하나로 원자로 공동에 물을 공급하여 원자로의 외벽을 냉각하는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다(Theofanous등, 1994). 원자로 용기의 외벽이 반구형이므로 이를 이차원으로(Theofanous등, 1994) 또는 수평면으로 단순화하거나(Yang등, 1997), 규모가 작은 반구형태로 모사하여(Chung등, 1996) 수행되었다. 이러한 실험적인 연구의

결론은 외벽 냉각에서의 열적여유(Thermal margin)가 수직면에서의 임계 열속에 의해 지배받는다는 것이다. 또한 수직면에서의 임계 열속은 기포거동과도 관계가 있고, 하부에서 수직면에 이르는 각도도 기포거동에 영향을 미치므로 이에 대한 물리적 현상 규명은 아주 중요하다.

임계 열속 근처에서 기포거동의 가시화는 핵비등과 막비등에서의 열전달을 이해 하는데 많은 도움이 되어왔다. 기포의 생성 및 거동에 대한 이론을 개개의 기포에 대해 실험을 수행해 검증(Han 등, 1965)하기도 하고, Gunther(1951), Jiji & Clark(1962), Tong 등(1966), Celata 등(1995), Galloway & Mudawar(1993)는 기포에 대한 이론적 근거를 가시화를 통해 입증했다. 최근들어, Bang 등(2000)이 과냉상태에서 기포거동을 가시화 했다. 하지만 이들은 가열면적을 작게 설계하여 국부적인 기포거동을 가시화 했다.

따라서 본 연구의 목적은 열속 변화에 따른 기포거동에 대한 물리적 현상을 가시화를 통해 규명하는 데 있다. 이를 위해서 사각 가열면을 갖는 히터블럭을 설계하여, 가열면을 수직, 상향, 하향면으로 배치하여 각도의 영향에 따른 열전달 및 임계 열속의 변화를 실험적으로 측정하였다. 비등 열전달 기구를 체계적으로 규명하기 위하여, 열전대로 온도를 측정하였으며, 아울러 고속 비디오 카메라를 이용하여 기포거동을 관찰하였다.

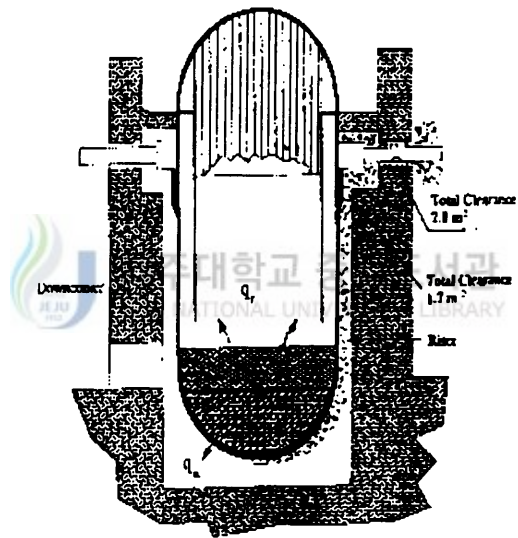
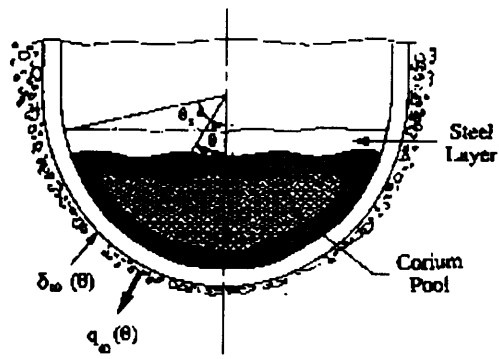


Fig.1. Schematic of the in-vessel retention phenomenology

## II. 실험 개요

### 1. 실험 장치 설명

실험장치의 주요부는 Fig.2와 같이 히터 블록과 히터 블록이 들어있는 수조 (Test section), 복수기로 이루어졌다.

#### 1.1. 히터 블록

Fig.3에 도시된 히터 블록은 히터가 설치된 구리 블록이 단열재가 내장된 지지 물에 삽입되어 하나의 구조물을 이룬다. 그리고 수직면에서의 임계 열속은 약  $1\text{MW/m}^2$  근처에서 발생하고 열손실 등도 고려해야 하므로, 전면에 균일하게 약  $1.5\text{MW/m}^2$  정도의 충분한 열출력을 낼 수 있게 설계하였다.

상향면에서의 수조비동에 대한 Zuber 모델(1959)과 Taylor wavelength scale을 사용하여 대기압에서, 임계 열속 및 기포의 크기를 계산하였다.

$$q_{CHF} = \frac{\pi}{24} \rho_g i_{fg} \cdot \left[ \frac{g\sigma(\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} = 1.1\text{MW/m}^2$$

$$\lambda_T = 2\pi \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \approx 1.6 \text{ cm}$$

또한, 경계면에서의 간섭효과를 배제하기 위해, 한 변이 70mm인 평면으로 설계하였고, 전면에 균일한 열출력을 내기 위해, 사각형 평면에 가로, 세로  $4 \times 4$  matrix 형태로 히터를 배열하였다. 여기에 사용한 Cartridge heater 사양은 직경 10mm, 길이 80mm, 그리고  $29\text{W/cm}^2$  Watt density(230V, 600W)인 Watlow사의 Cartridge heater(KEBG0080 C005A)이다. 히터가 설치된 구리 블록은 외경이 100mm이고 길이가 100mm인 원통형 블록을 사용하여, 길이방향으로 전면부 30mm를 가공해서 한 변이 70mm인 가열면으로 제작하였다.

히터블럭 전면부는 Test section 내에서 물과 직접적으로 닿기 때문에 잘 밀봉되어야 한다. 만일 물이 실험 중에 히터 블록 내부로 침투한다면, 물에 약한 MgO로

절연되어 있는 Cartridge heater가 손상될 수 있다. 또한 실험시 온도 범위가 약 100℃에서 300℃이므로 구리 블록의 수축 및 팽창을 완충시켜주면서 물이 히터로 침투하지 못하도록 밀봉되어야 한다. 이러한 조건을 만족하는 밀봉재로 High temperature silicon(용융온도:650°F, 310℃)을 사용하였다. 하지만, 실리콘도 막비등 영역에서 약 280℃에서 300℃정도의 온도에서 1시간정도 실험하고 나면 연성이 파괴되어 매 번 실험 시마다 교체했다.

구리 블록에 온도분포를 측정하기 위해서, 부착식으로 온도측정을 할 수 있는 열전대(Thermocouple)를 사용하였다. 구리 블록 전면부 표면으로부터 2mm, 4mm, 8mm, 12mm지점에 열전대를 설치하여 온도를 측정, 표면 열속을 계산하였다. 열전대의 위치도 열속을 측정하는 데 중요한 변수이므로, 정확한 배치가 중요하다. 정확한 배치를 위해선 전면부의 사각 블록에 측면으로 설치하는 것이 유리하지만, 누수문제가 발생하므로, 열전대 설치봉을 만들어 후면부로부터 삽입하는 방식을 취하였다. 우선, 구리 블록 후면부에 직경 약 3mm의 구멍을 전면부 표면으로부터 2mm지점까지 즉, 98mm깊이로 뚫었다. 열전대 설치봉은 직경이 3mm인 구리봉을 가공해서, 구리봉 끝단에서부터, 2mm, 4mm, 4mm지점에 4개의 열전대를 설치하였다 (Fig.3 참조). 4개의 열전대 설치용 구리봉을 축방향과 원주방향의 온도분포 측정을 위해 사각평면의 중심에서 수직으로 3곳, 수평으로 1곳에 설치되어 총 16개의 T type 열전대를 장착하였다. 이는 Fig.3에 잘 나타나 있다. 임계 열속 근처에서는 미세하게 출력조절을 해야하므로, 설정온도 이하로 출력을 조절하는 Temperature controller를 사용하였다. 이때의 온도는 구리 블록 후면부의 온도를 읽도록 했다.

구리 블록 자체는 재질이 유리인 세라쿨(Cerakwool)이라는 단열재를 사용하여 열손실을 줄였다. 그리고 물이 침투하지 못하도록 밀봉한 전면부는 재질이 나무이고 가공성이 좋은 Bakelite를 사용하여 사각 평면외 다른 부분으로의 열손실을 줄였다. 하지만 절연성이 좋고 가공성이 좋은 반면에 고온에 약해서 280℃에서 300℃정도의 온도에서 2시간정도 실험을 하고 나면 약간의 변형이 발생한다. 실험시

사각평면에서. 유로를 방해하면 안되므로 이것 또한 매 실험 시마다 교체했다





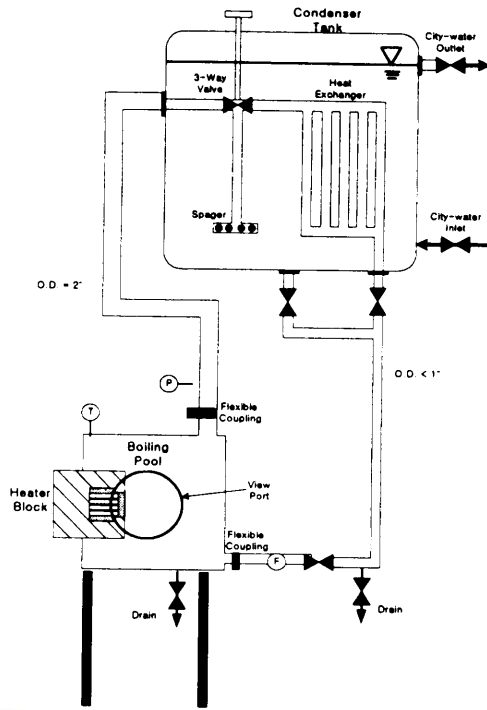


Fig.2. Schematic of the test facility

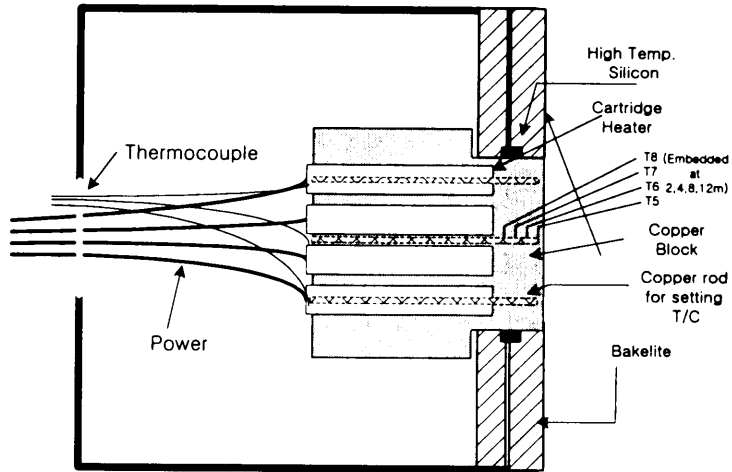


Fig.3-1. Side view of the heater block

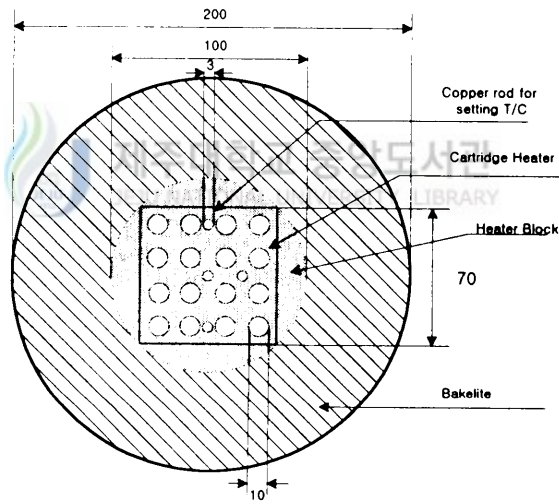


Fig.3-2. Front view of the heater block

Fig.3. Schematic of the heater block

## 1.2. 수조

대기압인 원자로 공동내의 조건으로 Test section을 설계하였다. 하지만 임계 열속에서 국부적인 압력이 발생하므로, 이를 고려해 두께가 5mm인 스텐레스 스틸 판으로 제작하였다. 물 온도 측정용으로 열전대를 설치하였고, 수조크기는 약 9KW의 히터 용량으로 충분하게 물의 포화온도를 유지할 수 있게 한 변이 400mm인 정육면체(물 질량:64kg)로 설계하였다. 수직면에선 충분한 유동이 발생하여 열전달이 잘 되지만, 하향면과 상향면에서는 유동이 충분히 이루어지지 않아 보조적인 가열을 고려해야 되므로 수조 내부에 Immersion heater(2kW, 220V)를 설치하였다. 또한 실험 중에 물을 포화온도로 유지키 위해, Immersion heater를 사용하여 간헐적인 가열을 하였다. 기포거동을 고속 촬영하기 위해, 정육면체 각 면에 관찰창을 설치하였다. 관찰창의 형태는 원형판이고, 두께는 10mm이다. 고온에 견딜 수 있도록 Poly-carbonate을 사용하여 제작하였다. 히터가 설치된 한 면만 제외한 나머지 면에서 촬영이 가능하도록 관찰창과 히터 블록의 배치를 했고, 이를 변화시키면서 수직면, 수평면, 하향면에 대한 실험이 가능하도록 설계하였다.

## 1.3. 복수기

300리터의 물탱크를 사용하여 수조형태의 복수기를 설계하였다. 실험 중에 발생하는 기화열을 복수기로 전달, 제거하기 위해, 열 교환기 튜브를 설치하였다. 이때, 열 교환용 튜브는 직경이 1인치이고, 길이 25cm인 구리파이프 8개를 연결하여, 최대 10kW 열 용량을 제거할 수 있게 설계하였다. 만약 최대 열 출력으로 약 1시간 정도 실험 시에는 물탱크의 응축열 용량의 한계에 다다른다. 이를 보충해주기 위해서 물탱크에 Inlet valve, Outlet valve를 설치하여, 강제적으로 물을 공급시켜 복수기 탱크의 응축열 용량을 늘릴 수 있게 했다. 응축열 용량이 한계에 다다른 순간적으로 Test section내에 가압될 수 있다. 이러한 점을 고려하여 열 교환기에 3Way valve를 설치, 여압을 배출시킬 수 있도록 설계하였다.

## 2. 계측장비

실험에서는 히터 블럭의 2차원 온도 분포, 압력, 기포의 거동 등이 측정해야 할 주요 실험인자들이다.

임계 열속 근처에서 순간 압이 생기므로, 이를 감시하고, 감압할 수 있도록 압력 센서를 설치하였다. 압력센서는 Omega사의 Current output transducer(PX605, cable type)를 사용하여, Test section의 Outlet pile에 설치하였다. 압력 측정 범위는 10기압이고, 4에서 20mA의 신호를 1에서 5V의 신호로 변환하여 데이터 수집장치(Data Acquisition System)에 공급한다.

온도는 열속을 계산하는데 있어, 중요한 실험인자이다. 본 실험에선 히터가 삽입된 구리 블럭에 열전대가 같이 설치되므로, noise가 많이 생길 수 있다. 그래서 열전대는 Ungrounded-junction type, Grounded-junction type, 그리고 노출형 중에서, noise를 쉽게 제거할 수 있는 Ungrounded-junction type을 사용하였다. 센서는 Omega사 제품을 사용하였다. 열속 측정용으로 설치한 16개의 열전대는 온도 측정 범위가 0℃에서 400℃이고, 직경이 0.5mm, 허용오차가  $\pm 1^\circ\text{C}$ 인, T type이다. 수조와 구리 블럭 후면에 설치한 열전대는 K type으로, 직경이 1.6mm, 허용오차가  $\pm 2^\circ\text{C}$ 이고, 측정범위가  $-200^\circ\text{C}$ 에서  $1000^\circ\text{C}$ 이다.

HP사의 VXI(모델명:E1401B) 데이터 수집장치를 이용하여 T type 열전대에 나오는 수 mV의 전압을 60Hz간격으로 샘플링(Sampling)해서, 온도로 변환, 저장하였다. 압력, 물 온도 등의 데이터도 VXI를 통해서 저장하였다. 실제로 입력되는 히터 출력(Power)을 알기 위해 Hook meter(HIOKI 3282)를 사용하여 전류를 측정하고, FLUKE사의 787 Processmeter로 전압을 측정하였고, 열전대로 측정, 계산한 값과 비교하여 손실되는 열속을 측정하였다. Fig.4에 도시된 것처럼,  $0.3\text{MW}/\text{m}^2$  근처에선 열손실이 거의 없고, 또한  $0.1\text{MW}/\text{m}^2$  이하에선 거리에 따른 측정 온도차는 T type 열전대의 오차범위 이내이므로( $\pm 1^\circ\text{C}$ ), Power 측정치를 사용하였다.

초당 1000frame을  $512 \times 512$ pixels로 촬영할 수 있는 Phantom V4.0 High speed

digital imaging system을 사용하여 수평면, 수직면, 하향면에서의 기포들의 움직임을 촬영하였다.

### 3. 실험 방법

실험은 먼저 상향면에서부터, 수직면, 하향면으로 진행되었다. 비응축성 가스의 영향을 없애고, 포화조건을 만들기 위해, 작동유체인 물을 충분히 가열하였다. 실험은 대기압, 포화상태에서 수행하였다. 출력은 약  $0.05\text{MW}/\text{m}^2$ 에서  $1.0\text{MW}/\text{m}^2$ 까지 단계적으로 가열, 각 단계 별로 정상상태에서 온도를 측정하였다. 열전대로 측정 계산한 열속을 보정하기 위해 입력 단자에서의 heater input power를 측정했다. 우선은 열전대를 통한 온도분포를 얻으면서 각 경우별(상향면, 수직면, 하향면)로 수 차례 실험을 하였고, 그리고 나서  $0.1\text{MW}/\text{m}^2$ ,  $0.3\text{MW}/\text{m}^2$ ,  $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ ,  $1\text{MW}/\text{m}^2$  출력에서 고속 카메라 촬영을 하였다. 고속 촬영은 1000 frame으로 1초 동안 촬영하였다.

가장 쉽게 접근할 수 있는 상향판에서 먼저 실험을 수행해서 각 열속에서 기포들의 생성되는 경향을 관찰했다. 일반적인 경향을 관찰하기 위해 같은 열속에서 수 차례 실험을 했지만, 막비등 영역에선 실험을 하지 않았다. 수직판에서도 같은 열속으로 단계적으로 실험을 수행했고, 막비등 영역에선, 일단 히터를 껐다. 그 상태에서  $50\text{kW}/\text{m}^2$ 에서  $60\text{kW}/\text{m}^2$  열속을 주면서 정상 상태에서의 데이터를 얻으려고 했다. 하지만  $280^\circ\text{C}$ 이상의 고온이므로 장시간 실험을 할 수 없어서, 결국 정상 상태의 막비등 영역에서의 열속은 측정하지 못했다.

하향면 기준으로  $0^\circ$ 의 경사각으로 하향면 실험을 시작했으나, 전혀 유동이 없어 기포가 생기는 데로 그 자리에서 멎쳐졌고, 그러는 동안 구리 블록의 표면온도는 계속 완만하게 상승하였다. 결국 안정된 출력조절을 할 수 없어,  $6^\circ$ (하향면 기준)의 경사각을 주어 실험을 하였다. 여기서도 수직면과 마찬가지로 일정한 열속 변화를 주면서 여러 차례 실험을 하였고, 기포거동은  $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ ,  $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ 에 대

해서 고속촬영을 하였다.

수직면과 하향면에서의 막비등 실험은 열전달 영역이 임계 열속을 넘어간 직후 출력을 끄고, 냉각되는 과정에서 표면온도에 맞는 수십  $\text{kW/m}^2$ 의 정상출력을 찾아 나갔다. 또한 반대로 어느 정도 냉각 후에 같은 열속을 주어 표면온도를 상승시키면서 실험을 하였다. 두 가지의 경우, 같은 열속에서 표면과열도가 달라 정상상태로 보기 어렵지만, 표면과열도가 약 180K로 Dhir등(1985)의 실험에서처럼, 막비등 영역임을 알 수 있었다. 막비등 영역에서의 실험은 고속촬영을 통한 기포 거동 가시화만 시도하였다.

	상향면	수직면	하향면(6° )	비고
열속 측정	0.1MW/m' - 1MW/m'	0.1MW/m' - CHF	0.1MW/m' - CHF	상향면에선 DNB를 안넘김
고속 촬영	0.1, 0.3, 0.8, 1MW/m'	0.1, 0.3, 0.8, 1MW/m', 막비등	0.5, 0.8MW/m', 막비등	상향면에선 핵비등영역촬영

Table.1. Experiment matrix

### III. 실험 결과

가열면의 열속은 열전대로 측정된 값으로 계산하였다. Heater input power를 1로 놓고 열전대로 측정된 값을 비교한 Fig.4에서 보면 열속이 낮을 때는 열손실이 거의 없지만, 0.8MW/m<sup>2</sup>이상에선 약 10%정도의 손실이 있음을 알 수 있다. 한편, 표면온도 및 열속은 열전대용 설치봉에 부착된 열전대에서 측정된 온도를 이용하여 구하였다.

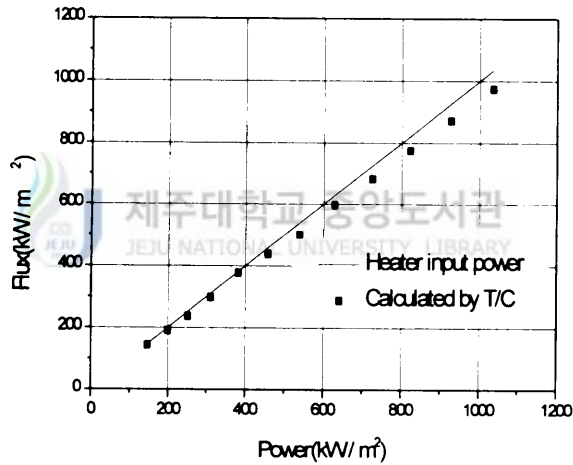


Fig.4. Power to flux

표면 열속과 온도는 다음과 같은 1차원 열전도 방정식을 사용하여 계산하였다.

$$q'' = k \frac{dT}{dx}, \quad T_w = T_{\text{measured}} - \frac{q''}{k} dx$$

## 1. 열전달

### 1.1. 핵비등

Fig.5, 6, 7에서 수직면, 수평면, 하향면에서의 열속이 도시되어 있다. 수직면과 상향면, 하향면의 경우에서, 열전달은 유사한 경향을 보였으나, 이에 따른 기포거동은 판이하게 다른 양상을 보였다. 또한, Nishikawa등(1983)이 실험한 data와 비교하였다.

임계 열속 값을 보면, 수직면은 약  $1.1\text{MW}/\text{m}^2$  정도, 하향면은 약  $0.8\text{MW}/\text{m}^2$  정도로 측정되어졌다. 수직면에서, 측정된  $1.1\text{MW}/\text{m}^2$ 의 값은 Dhir등(1985)가 수직면에서 측정한 임계 열속 값인 약  $0.9\text{MW}/\text{m}^2$ , Nishikawa등(1983)의 경우  $0.7\text{MW}/\text{m}^2$ 보다 다소 크다. 하지만, 임계 열속 지점에서의 가열면 과열도는 약 20K에서 24K로 일치하였다. 수직에서뿐만 아니라, 하향의 경우에도 Fig.7에서 보면 알 수 있듯이, 가열면 과열도는 약 20K로 경향이 일치했다. 비등과정은 가열면의 온도에 따라 비등 열전달률이 최대 혹은 최소가 되는 여러 비등영역이 구성된다는 것이 Nukiyama(1934)에 의해 밝혀졌듯이 열전달 계수는 가열면의 온도가 지배적이라는 것을 알 수 있다. 정량적인 비교를 할 수는 없지만 Dhir등(1985)과의 차이는 표면 거칠기와 가열면의 Geometry가 달라, 임계 열속 값에 많은 영향을 주었을 것으로 판단된다.

Fig.5, 6에서 보듯이 상향면과 수직면의 경우, 약  $0.8\text{MW}/\text{m}^2$  근처에서 열전달 경향이 변화하는 것을 볼 수 있다. 이때의 기포의 유동형태를 관찰하면 기포거동이 상당히 활발해 짐으로써, 열전달률이 좋아진다는 것을 알 수 있다. 하향면에서도, 기포의 거동이 바뀌는  $0.5\text{MW}/\text{m}^2$  부근에서 열전달 경향이 바뀐다. 임계 열속은 약  $0.8\text{MW}/\text{m}^2$ 로 측정되었다. Nishikawa등(1983)의 경우에서와 마찬가지로, 낮은 열속에선 가열면의 각도가 열전달 경향에 영향을 미쳤으나, 높은 열속으로 갈수록 가열면의 각도의 영향에 상관없이 열전달 경향이 일정한 것을 알 수 있다(Fig.8).



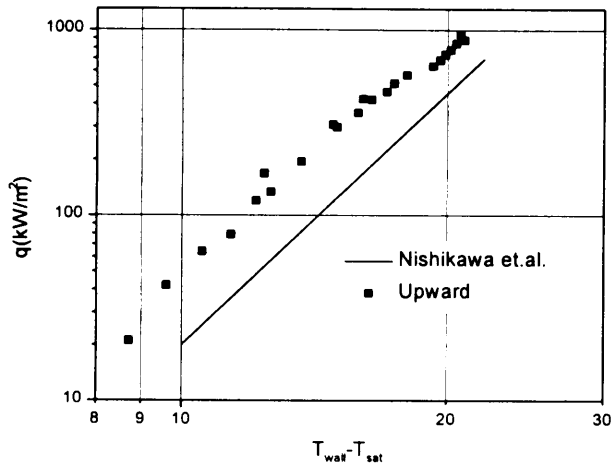


Fig.5. Heat flux of the upward plate

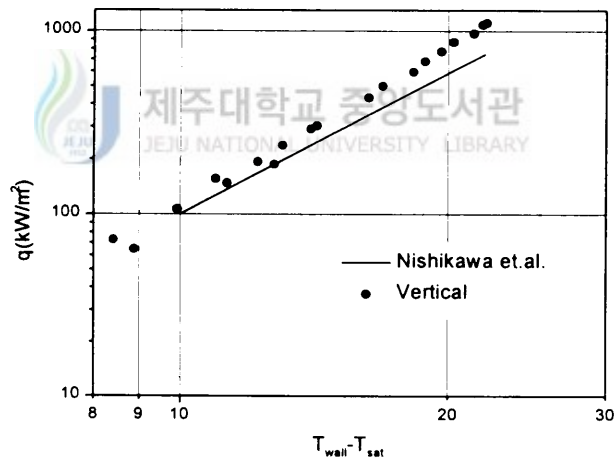


Fig.6. Heat flux of the vertical plate

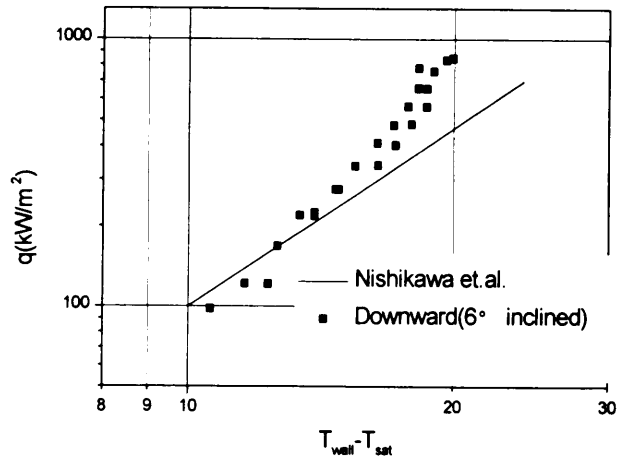


Fig.7. Heat flux of the 6° inclined downward plate

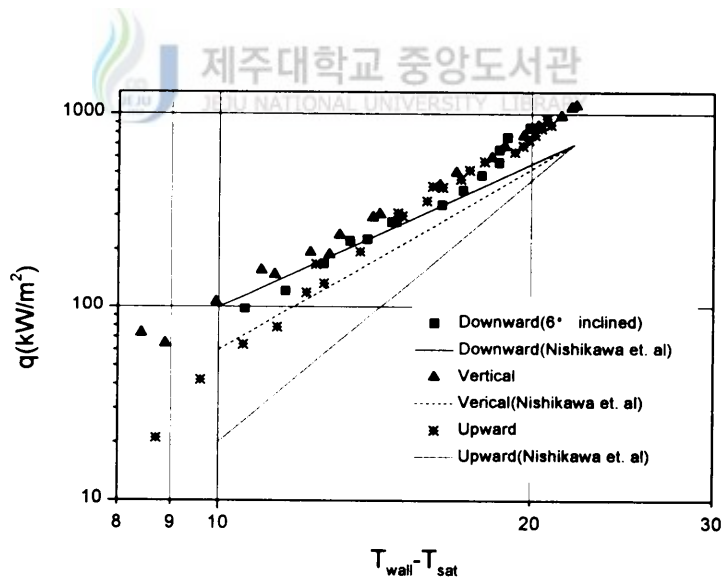


Fig.8. Comparison of the heat flux with Nishikawa et.al.

## 1.2. 막비등

측방향에서의 온도분포를 도시한 Fig.9, 10을 보면 임계 열속을 지나면서 열전달이 급격히 나빠져서 온도가 급상승하는 것을 알 수 있다. 수직면에서 초당 약 3℃ 상승, 하향면에선, 초당 약 2℃ 상승으로 수직면의 경우가 보다 완만한 증가세를 보이면서 막비등 영역으로 천이되었다. 수직면의 경우에서, Dhir등(1985)에서처럼 가열면 과열도가 70K 에서 100K 사이에서 정상 상태의 막비등 영역과 과도기 상태인 천이영역이 구분되어 진다고 판단할 수 있으므로, 본 연구에서도 표면과열도가 180K에서 200K정도에서 고속촬영을 하였다. 표면온도가 200℃ 이상에서 열속은 0.05-0.06MW/m<sup>2</sup>로 측정되어 실험 오차 범위 부근이어서, 막 비등 영역에 대한 실험 자료를 정확하게 구하기가 어려웠다.

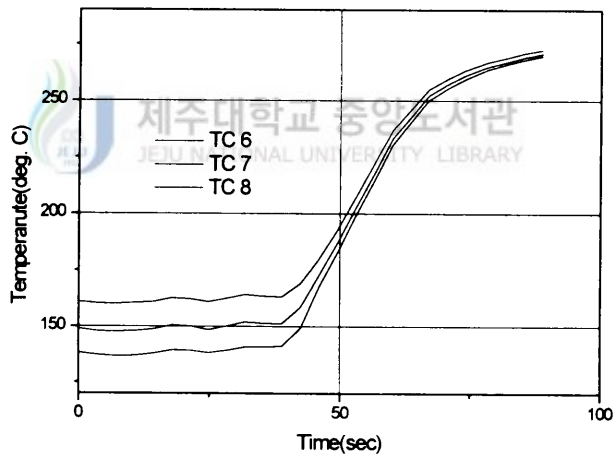


Fig.9. Temperature jump of the vertical plate

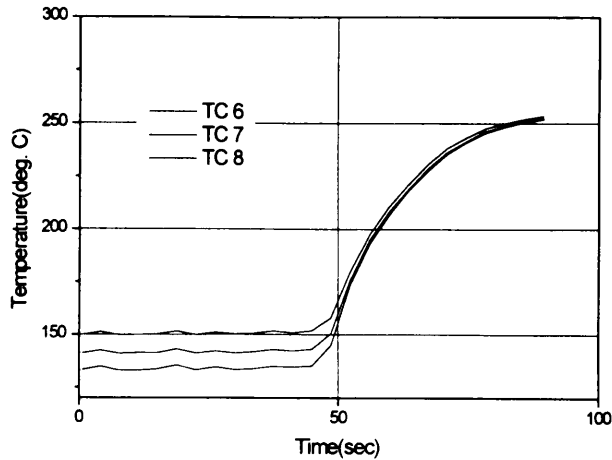


Fig.10. Temperature jump of the 6° inclined downward plate

### 1.3. 압력거동

임계 열속 근처에서의 압력거동은 하향면에 비해 수직면에서 더 활발한 변화를 보였다. 수직면의 경우, 임계 열속을 지나면서 표면온도가 약 10℃ 감소하고, 그와 동시에 순간적으로 압력은 약 0.005bar의 상승을 보인다. 표면온도가 급상승을 하는 시점(천이영역)에서의 압력은 0.03bar 로 약 6배정도 감소하는 것을 알 수 있다. 막비등에서 핵비등으로의 냉각과정에서도, 0.005bar의 압력 차로 변화를 보이다가 핵비등 영역에선 거의 일정한 압력을 보인다(Fig.11 참조). 하지만 하향면의 경우는, 열속의 변화에 무관하게 거의 일정한 압력변화를 보인다. 표면온도가 급상승하는 시점에선, 수직면과 비슷한 약 0.004bar의 감소를 보이고, 냉각과정에선 거의 일정한 압력을 유지하였다(Fig.12 참조).

전체적으로 압력 차의 최고치를 비교하면, 수직면, 하향면 각각 약 0.086bar, 0.03bar로 수직면의 경우에서 압력변화가 더 심하다는 것을 알 수 있다.

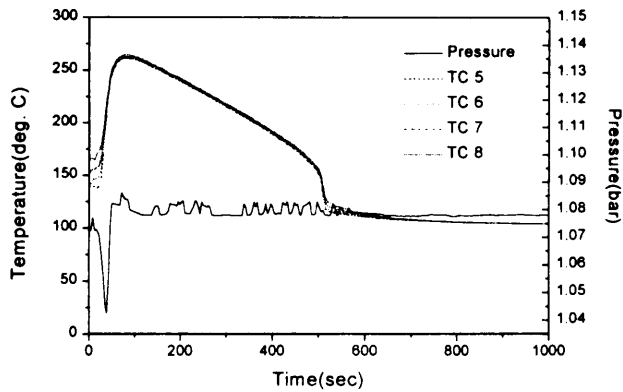


Fig.11. Pressure variation of the vertical plate

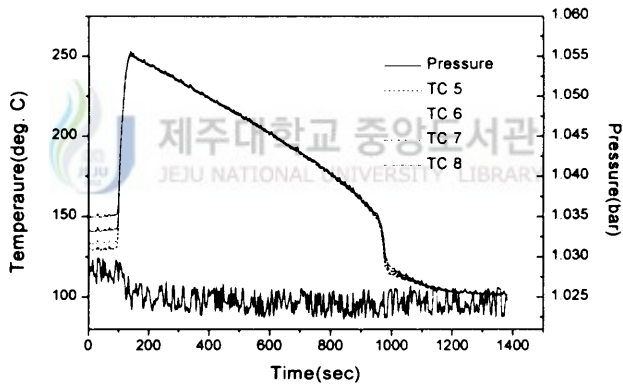


Fig.12. Pressure variation of the 6° inclined downward plate

#### 1.4. 상관식 비교

완전발달 핵비등 열전달에 대한 관계를 정립하기 위하여 많은 관계식이 제시되었다. 이중 가장 많이 사용되는 것으로, 단상대류 열전달의 경우와 같이 열은 먼저 가열면으로부터 인접한 후류에서 발생하는 유동교란에 의한 것으로 가정한 Rohsenow(1952)의 모델이 있다. Rohsenow의 상관식을 사용하여 본 실험결과와 Nishikawa(1983)의 결과를 같이 비교하여 표면의 거칠기가 미치는 영향을 알아보았다.

$$\left[ \frac{C_{pf}(T_w - T_{sat})}{i_{fg}} \right] = C_{sf} \left[ \frac{q''}{i_{fg}\mu_f} \left( \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/2} \right]^m \left[ \frac{c_p \mu}{k} \right]^n_f$$

$C_{sf}$ 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 프란틀 수가 압력의 단조로운 함수가 아니므로,  $n=1$ 이 좀 더 정확한 결과를 준다. Rohsenow상관식을 사용하여 수직면, 하향면, 상향면의 실험데이터를 fitting한 결과,  $C_{sf}=0.0027$ 이다. Nishikawa(1983)의 경우는 0.003으로 본 실험과 비슷한 경향을 보였다.

표면-액체조합	$C_{sf}$	$n$
물-니켈	0.006	1.0
물-백금	0.013	1.0
물-구리(polished)	0.013	1.0
물-구리(rough)	0.0068	1.0
물-황동	0.006	1.0
카본 테트라크로라이드-구리	0.013	1.7
벤진-크로미움	0.010	1.7
n-펜탄 - 크로미움	0.015	1.7
에틸알콜- 크로미움	0.0027	1.7
이소프로필알콜-구리	0.0025	1.7
35%포타시움카보네이트-구리	0.0054	1.7
50% 포타시움 카보네이트 - 구리	0.0027	1.7
n-부틸알콜 - 구리	0.0030	1.7

Table.2. Rohsenow correlation with  $m=0.33$

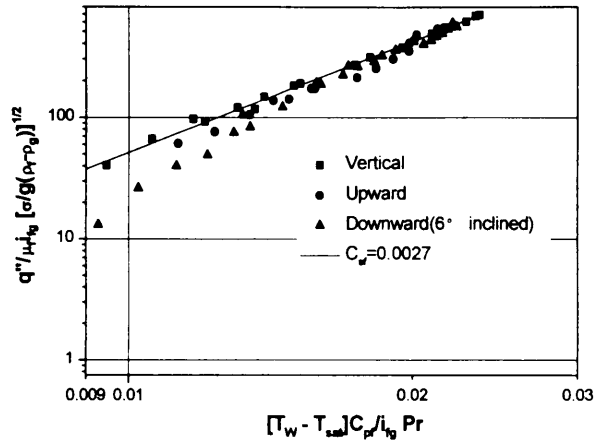


Fig.13. Data fit of experiments with Rohsenow correlation(  $C_{sf}$  )

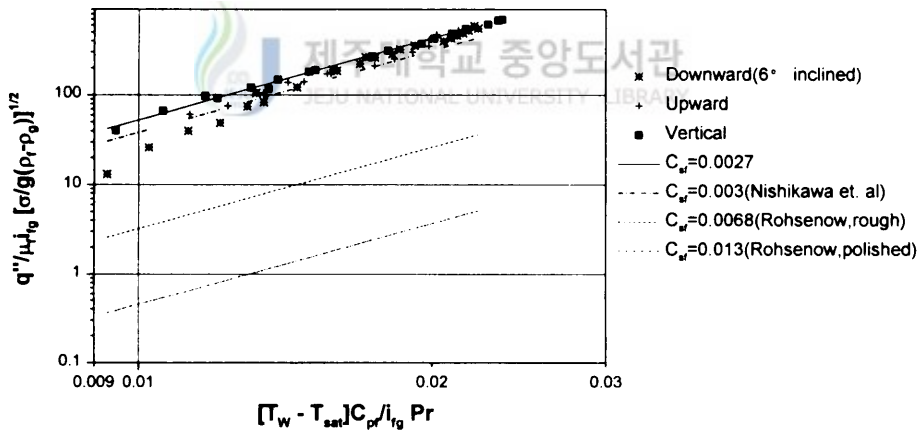


Fig.14. Comparison of other experiments

## 2. 열속 변화에 따른 기포 거동의 가시화

고속 비디오 카메라를 이용하여, 열속 변화에 따른 기포의 거동을 가시화 하였다. 어느 경우에서나 가열면으로부터 폭발적으로 기포가 발생하였고, 거시적으로 기포의 거동이 주기적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 거시적인 거동은 열속과 가열면의 각도에 따라 판이하게 다른 것을 알 수 있었다. 막비등 영역에선 하향면과 수직면에 대해서 관찰했고 시각적으로 일정한 양상을 보였다.

### 2.1. 핵비등

상향면, 수직면에서 보면,  $0.2\text{MW}/\text{m}^2$ 에서  $0.3\text{MW}/\text{m}^2$ 사이에서 기포들의 거동이 달라지면서 열전달에 영향을 주었고, 임계 열속 부근에선 비슷한 경향으로 기포거동을 관찰할 수 있었다.

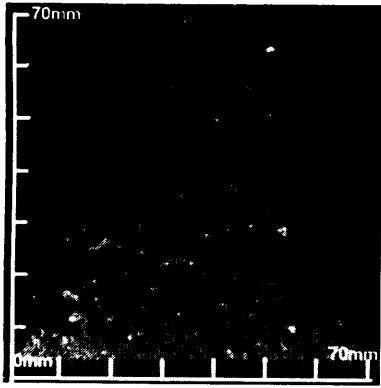
#### 2.1.1. 상향면

##### (a) $0.1\text{MW}/\text{m}^2$

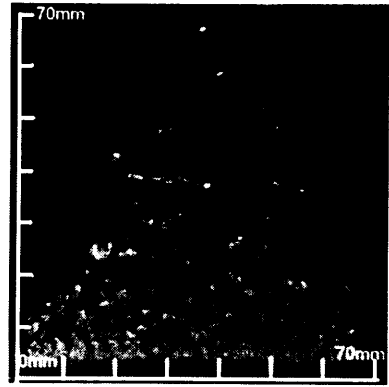


Fig.15에 도시된 것처럼,  $0.1\text{MW}/\text{m}^2$ 근처에선 10mm이내의 크기로 작은 기포알갱이들이 생성하면서 초기상태의 핵비등을 보인다(Isolated bubble). 그림에서 기포의 속도를 측정하기 위해 하나의 기포에 표시를 하여 상승속도를 알 수 있게 했다. 기포들은 가열면 근처에선 대략 5mm 크기지만, 약 47cm/sec의 속도로 상승하면서 약 10mm의 크기로 뭉쳐진다.

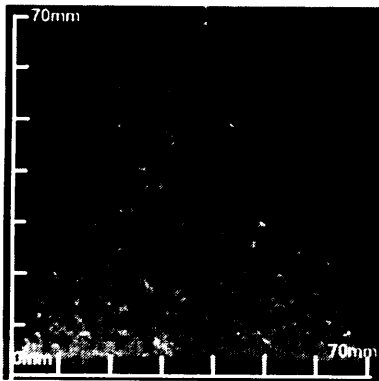




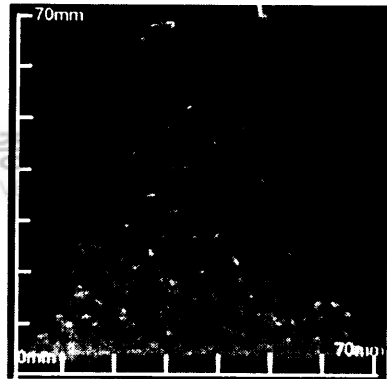
(a) Frame # -3989 ( 0 sec )



(b) Frame # -3939 ( 0.05sec )



(c) Frame # -3916 ( 0.073sec )



(d) Frame # -3864 ( 0.125sec )

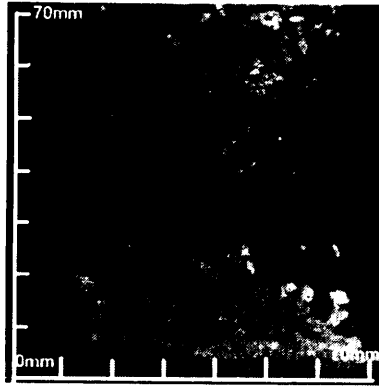
Fig.15. The isolated bubbles in the upward plate at  $0.1\text{MW}/\text{m}^2$

### (b) 0.3MW/m<sup>2</sup>

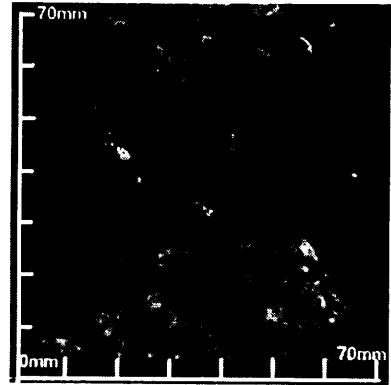
Fig.16에 도시된 것처럼, 시각적으로도 기포들의 뭉쳐짐(coalescence)이 두드러짐을 알 수 있다. 기포들이 가열면 부근에선 약 10mm이내에 크기로 촘촘히 형성되어 있다. 하지만 상승하면서 하나 하나의 정확한 기포크기는 알 수 없지만, 대략적으로 기포 경계면사이의 거리가 최대 20mm까지 된다. 기포가 생성되고 상승하면서 뭉쳐지고, 떨어져나가면서 1사이클을 이룬다. 떨어져 나갈 때의 기포크기는 대략 30mm정도의 크기이고 100/1000sec, 10Hz Frequency를 보인다.

### (c) 0.8 MW/m<sup>2</sup>

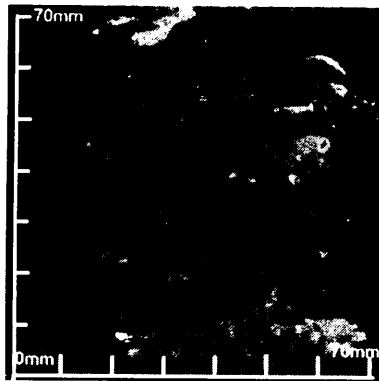
Fig.17에서 도시된 것처럼, 기포가 생성, 상승하면서 뭉쳐지고, 떨어져나가는 주기적인 양상을 보인다. 하지만 0.8MW/m<sup>2</sup>에선 좀 더 뭉쳐짐 양상이 두드러짐을 알 수 있다. 가열면 근처에서의 기포 크기는 약 10mm의 크기로 0.3 MW/m<sup>2</sup>에서와 같았지만, 상승하자마자 약 25mm 크기로 뭉쳐진다. 대략적으로 한번에 3개의 기포가 뭉쳐져 있는 것을 알 수 있다. 떨어져 나갈때의 기포는 버섯 모양으로 중심이 늘고 옆으로 퍼지는 형상을 보인다. 이때 기포의 중심이 끊어지면서 기포가 깨지기도 하고, 다음의 생성되는 기포와 연결고리를 가지면서 빠져나가기도 한다. 1 cycle의 시간은 121/1000sec, 8.3Hz로 약간 느려졌음을 알 수 있다.



(a) Frame # -3860 ( 0sec )



(b) Frame # -3820 ( 0.040sec )



(c) Frame # -3760 ( 0.100sec )



(a)

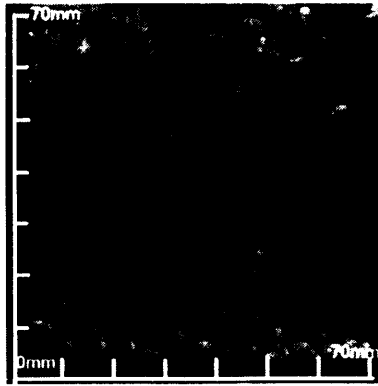


(b)

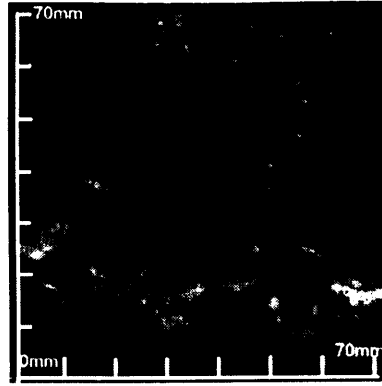


(c)

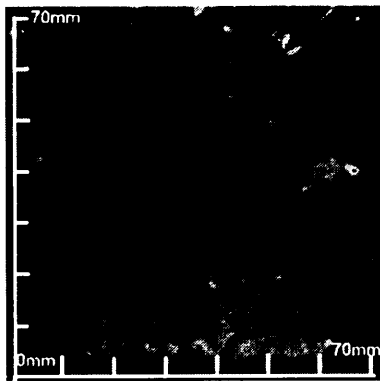
Fig.16. The coalescent bubbles in the upward plate at  $0.3\text{MW/m}^2$



(a) Frame # -3945 ( 0sec )



(b) Frame # -3908 ( 0.037sec )



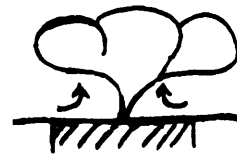
(c) Frame # -3824 ( 0.121sec )



(a)



(b)



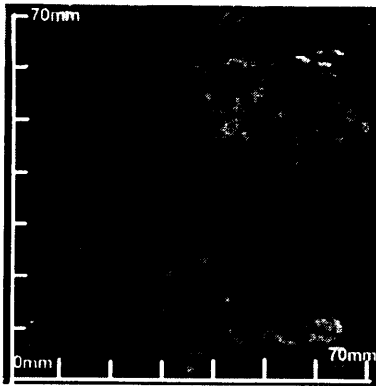
(c)

Fig.17. The coalescent bubbles in the upward plate at  $0.8\text{MW}/\text{m}^2$

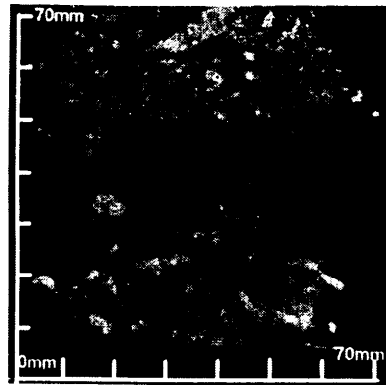
#### (d) 1 MW/m'

Fig.18에 도시된 그림을 보면 마치 히로시마 원폭을 연상시킬 정도로 기포의 뭉쳐짐 현상이 뚜렷해진다. 여기서도 가열면 근처에서 정확히 알 수 없지만 약 10mm의 기포들이 서로 접해 있다가 3개정도의 기포들이 뭉쳐진 것처럼 되는데 (Frame # -3931), 이는 0.8MW/m'의 Frame # -3908과 같은 양상을 보인다. 하지만 시간을 보면 0.8MW/m'에선 37/1000sec이고 여기선 15/1000sec로 훨씬 빨라졌음을 알 수 있다. 기포가 좀 더 커지면서 마치 70mm이상의 기포가 버섯 형태로 상승하는 것을 보이고, 떨어져 나간다. 이때, 한 주기에 걸린 시간은 144/1000sec, 6.9Hz이다. 부분적으로 보면, 기포들의 뭉쳐짐 현상이 열속이 높아지면서 더 뚜렷해지는 것을 알 수 있고, 전체적으로 보면, 기포가 상당히 커서 가열면 부근에서 오랫동안 머물러 있는 것을 알 수 있다.

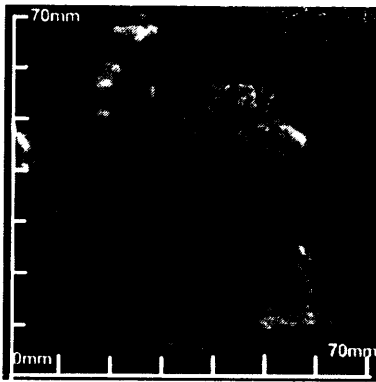




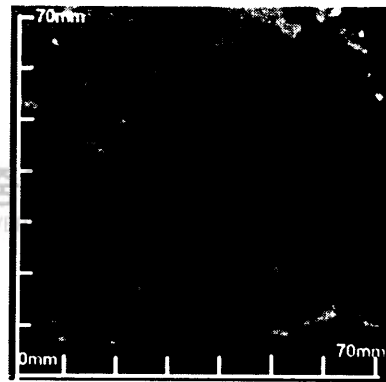
(a) Frame # -3946 ( 0sec )



(b) Frame # -3931 ( 0.015sec )



(c) Frame # -3875 ( 0.071sec )



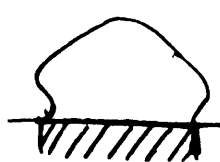
(d) Frame # -3802 ( 0.144sec )



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.18. The mushroom-like bubble in the upward plate at  $1.0\text{MW/m}^2$

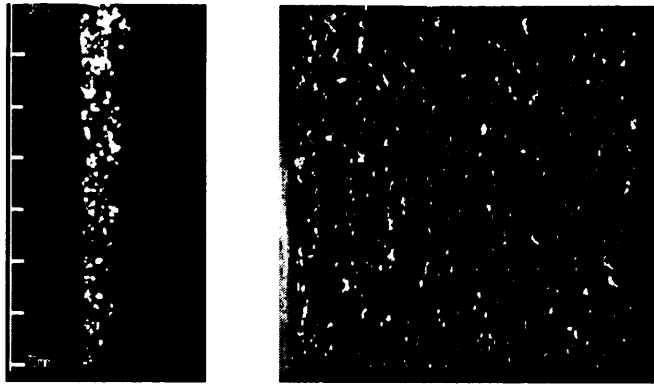
## 2.1.2 수직면

### (a) 0.1 MW/m<sup>2</sup>

Fig.19에서 보면 알 수 있듯이, 상향면에서와 마찬가지로 구슬들이 굴러가는 것과 같은 초기 상태의 핵비등을 보인다(Isolated bubbles). 서로 겹쳐진 기포들의 영상으로 인해 상향면에서 같이 기포의 유동속도를 관찰하진 못했다. 가열면에서 생성된 기포는 시각적인 변화없이 상승하는데 크기는 대략 5 - 6mm 정도이다. 상향면에선 상승과정에서 약간의 뭉쳐짐이 있지만 여기서 전혀 관찰할 수 없었다.

### (b) 0.3 MW/m<sup>2</sup>

Fig.20에선, 시각적으로 기포의 거동경향이 달라졌음을 알 수 있다. 여기서부터는 기포가 생성, 성장, 그리고 상승하는 일정한 주기를 보인다. 전체적으로 물결모양의 기포형태(Wavy bubble)를 보인다. 초기에 타원형의 형태로 5개의 기포가 생성되는데, 가열면의 상부로 갈수록 기포의 크기가 더 크다. 그 크기를 보면 길이 10mm, 높이 5mm에서부터 상부로 갈수록 겹쳐진 형태로 길이 약20mm 높이 20mm이다. 기포가 생성되고 빠져나가는데 걸린 시간은 약 73/1000sec이고 Frequency는 약 13.69Hz이다.



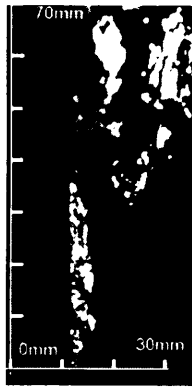
(a)

(b)

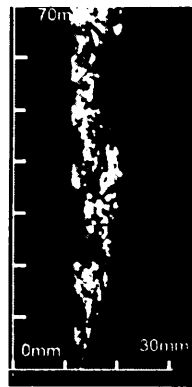


Fig.19. The side(a) and front(b) view of isolated bubbles in the vertical plate at  $0.1\text{MW/m}^2$

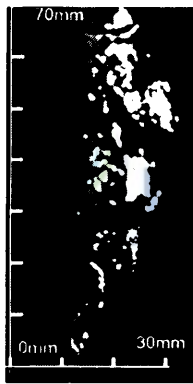




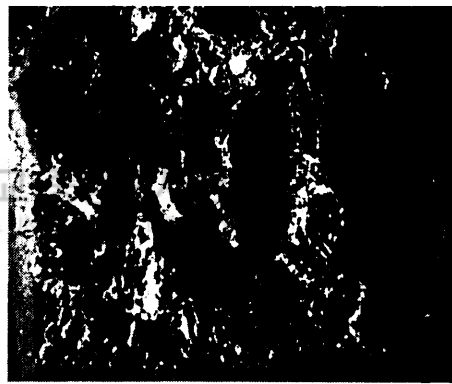
(a) Frame # -384 ( 0sec )



(b) Frame # -343 ( 0.041sec )



(c) Frame # -311 ( 0.073sec )



(d) Front view of frame # -311



(a)



(b)



(c)

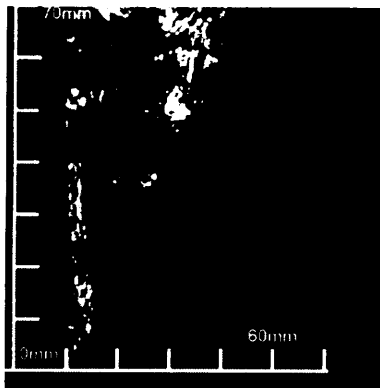
Fig.20. The Wavy bubbles in the vertical plate at  $0.3\text{MW/m}^2$

### (c) 0.8 MW/m<sup>2</sup>

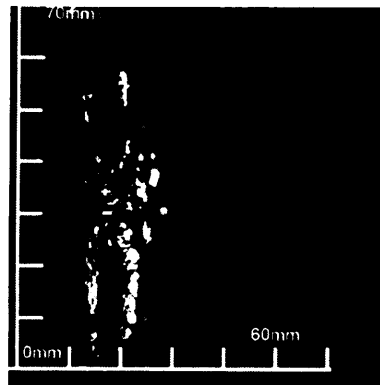
Fig.2.에서 관찰하면, 0.3 MW/m<sup>2</sup>에서와 같이 기포가 생성되고 커지고 상승하는 주기를 보이고 전체적으로 물결모양의 형태를 보이지만, 주기는 좀 더 빨라진다. 초기엔 0.3 MW/m<sup>2</sup>에서처럼 기포가 생성된다. 하지만 가열면 근처에서 팽창하는 과정에서 2개정도의 기포가 형성된다. 또한 0.3MW/m<sup>2</sup>와는 달리 가열면 길이에 따른 기포의 크기는 일정하다. 전체적으로 타원형의 형태이고, 2개의 기포가 전체 가열면을 덮고 있고, 높이는 약 30mm 정도이다. 기포의 생성주기는 약 63/1000sec이고, Frequency는 15.87Hz이다.

### (d) 1.0 MW/m<sup>2</sup>

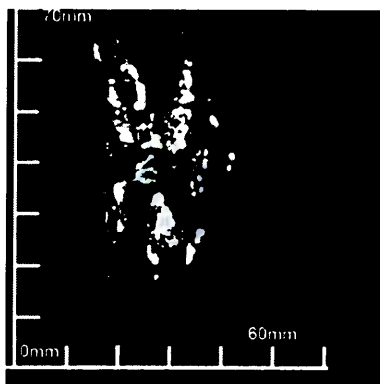
앞에서와 같이, 기포가 생성되고 커지고 상승하는 주기적인 양상을 관찰할 수 있다. 하지만 여기서 초기부터 마치 하나의 기포처럼 뭉쳐진 상태로 생성된다. 생성된 기포는 성장하면서 가열면 전체를 덮을 정도로 커진다. 이때의 크기는 높이 약 30mm로 0.8MW/m<sup>2</sup>에서 비슷한 크기를 보였다. 하지만 기포가 생성되는 주기는 약 50/1000sec로 약간 빨라졌다. 이때의 Frequency는 약 20Hz이다(Fig.22 참조).



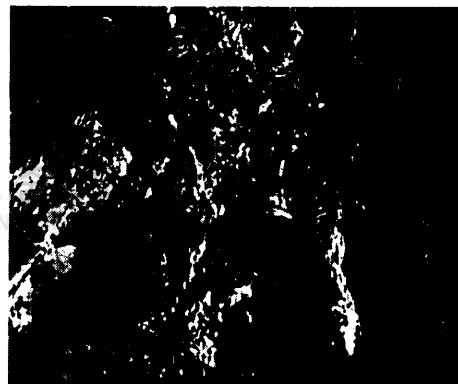
(a) Frame # -3047 ( 0sec )



(b) Frame # -3014 ( 0.033sec )



(c) Frame # -2984 ( 0.063sec )



(d) Front view of frame # -2984



(a)

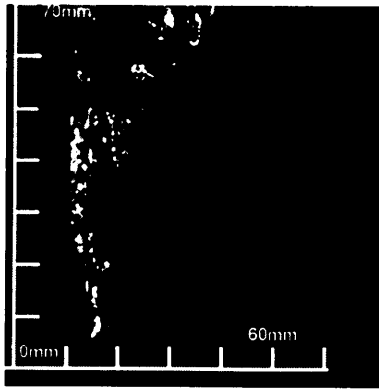


(b)

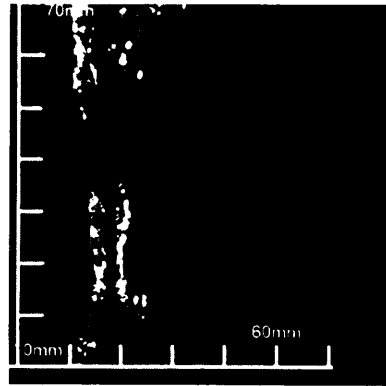


(c)

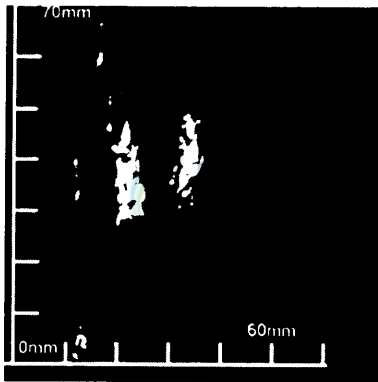
Fig.21. The Wavy bubbles in the vertical plate at  $0.8\text{MW/m}^2$



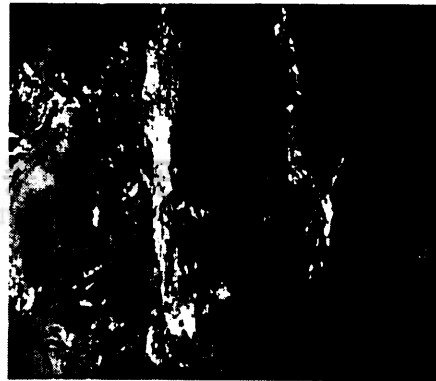
(a) Frame # -3512 ( 0sec )



(b) Frame # -3500 ( 0.012sec )



(c) Frame # -3466 ( 0.046sec )



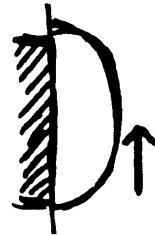
(d) Front view of frame # -3466



(a)



(b)



(c)

Fig.22. The Wavy bubbles in the vertical plate at  $1.0\text{MW/m}^2$

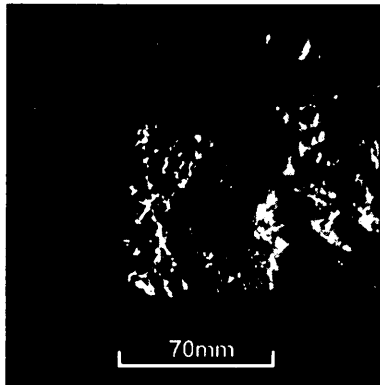
### 2.1.3 하향면

#### (a) 0.5MW/m<sup>2</sup>

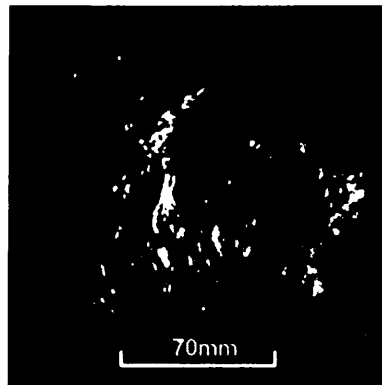
기포가 막 형태로 표면을 전체적으로 뒤덮으면서 빠져나가는 거동을 보인다 (Elongated bubbles). 여러 개의 작은 기포가 생성되고 가열면 근처에서 뭉쳐져서 마치 하나의 기포가 생성되는 것처럼 보인다. 생성된 기포는 가열면 이외의 절연체 부분까지 계속 성장하고 더 이상 커질 수 없어서 빠져나간다. 이런 식으로 한번 기포가 빠져나가는 데 걸린 시간은 약 132/1000sec이고, Frequency는 7.57Hz이다. 약 0.5MW/m<sup>2</sup>까지는 기포가 출력에 따라 커지지만 그 이후의 출력에선 점점 작아지는 경향을 보인다(Fig.23).

#### (b) 0.8MW/m<sup>2</sup>

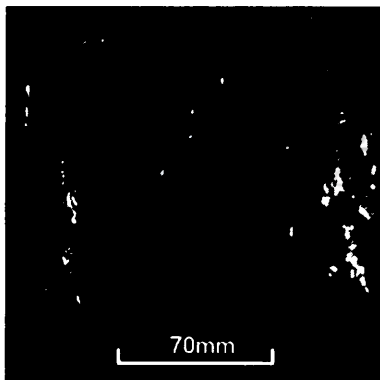
Fig.24에서 보여지듯이, 이제까지와는 다르게 약 0.6MW/m<sup>2</sup>에선 기포가 커지지 않고 작아지는 양상을 보인다. 기포는 작아졌지만, 기포거동 속도는 0.5MW/m<sup>2</sup>에 비해 전혀 빨라지지 않았다. 여기서도 0.5MW/m<sup>2</sup>에서와 마찬가지로 여러 개의 기포가 가열면 근처에서 하나의 기포로 뭉쳐져 머물렀다가 빠져나가는 주기를 보인다(Elongated bubble). 기포가 한번 빠져나가는 데 걸린 시간은 약 133/1000sec이고, Frequency는 약 7.52Hz이다.



(a) Frame # -3934 ( 0sec )



(b) Frame # -3867 ( 0.067sec )



(c) Frame # -3802 ( 0.132sec )



(a)

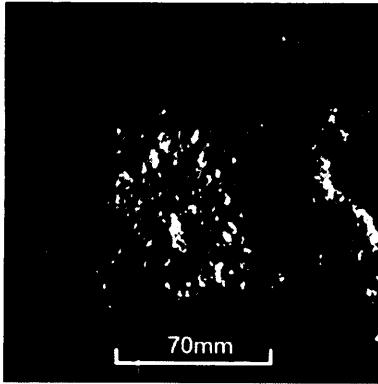


(b)

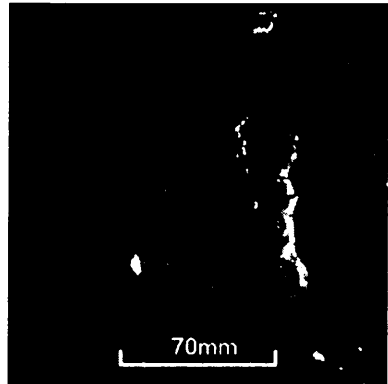


(c)

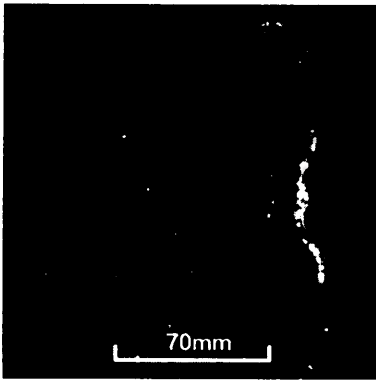
Fig.23. The elongated bubbles in the 6° inclined downward plate at 0.5MW/m' (flow: ►)



(a) Frame # -2643 ( 0sec )



(b) Frame # -2546 ( 0.097sec )



(c) Frame # -2510 ( 0.133sec )

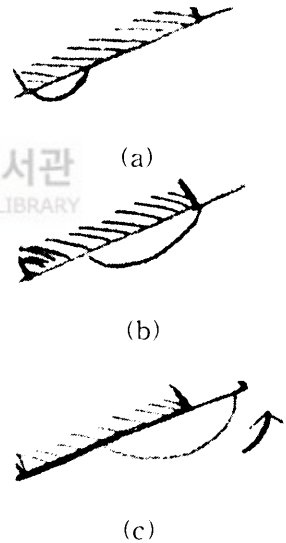


Fig.24. The elongated bubbles in the  $6^\circ$  inclined downward plate at  $0.8\text{MW/m}^2$  (flow:  $\blacktriangleright$ )

## 2.2 막비등

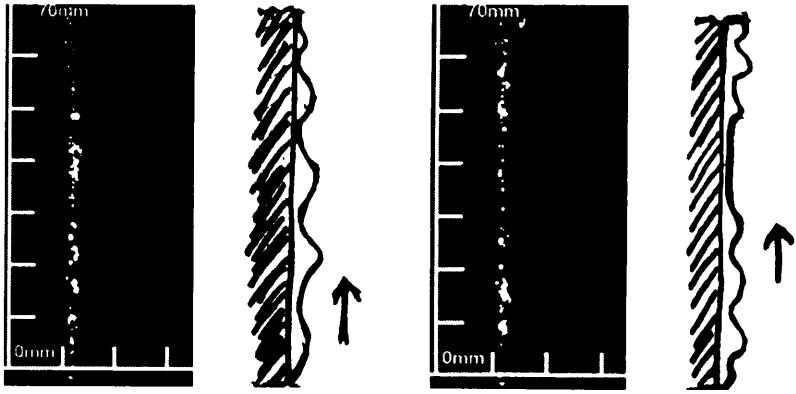
본 연구의 초점이 증대사고시의 원자로 하부반구의 외벽냉각에 있으므로, 수직면과 하향면에 대해서만 막비등 영역에서 관찰하였다.

수직면 촬영시 측면과 정면에서 촬영하였다. 표면을 덮고 있는 얇은 막을 관찰하기 위해 측면에서 촬영하였지만, 핵비등 영역에서의 기포가 깨지면서 표면주위에 달라 붙어버려 정량적으로 가열면 막 관찰은 하지 못하였다. 기포의 크기는 표면에서 높이 2 - 4mm로 표면의 얇은 위로 상승하는 모습을 관찰할 수 있다. 그러면서 표면에 붙어있는 기포들은 지속적인 얇은 막 층을 형성하면서, 일정한 속도(약 37/1000sec)로 파고를 형성하면서 상승한다(Fig.25).

정면에서 촬영한 그림을 보면 하나의 기포가 아니라 여러 개의 조그만 기포들이 촘촘히 연결된 형태로 전체 가열면을 덮고 있는 것을 알 수 있다. 새로운 기포들은 계속해서 생기지만 전체면에서 동시에 생성되므로 전체로서는 하나의 기포가 막을 형성하는 것이 됨을 알 수 있다.

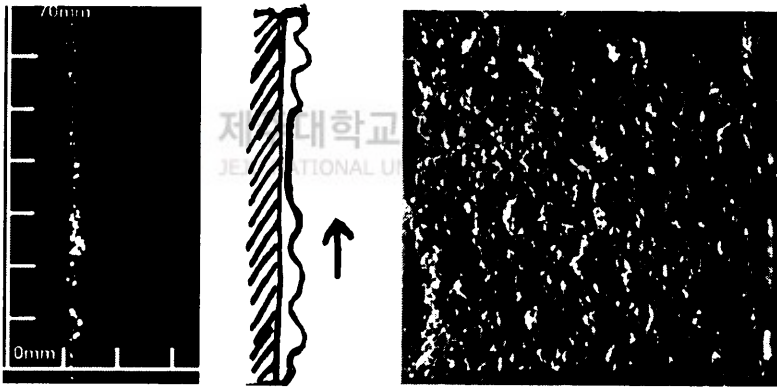
하향면에서는 정면에서 촬영하였다. 표면을 자세히 관찰해 보면 수직면에서처럼 비슷한 경향으로 하나의 막을 형성한다. 하지만 기포들이 비교적 원활히 빠져나가지 못해 뭉쳐지면서 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이때의 빠져나가는 기포를 보면, 마치  $0.5\text{MW}/\text{m}^2$ 에서 생성되면서 빠져나가는 기포거동과 비슷했다(Fig.26).





(a) Frame # -3492 ( 0sec )

(b) Frame # -3479 ( 0.013sec )



(c) Frame # -3455 ( 0.037sec )

(d) Front view of film boiling

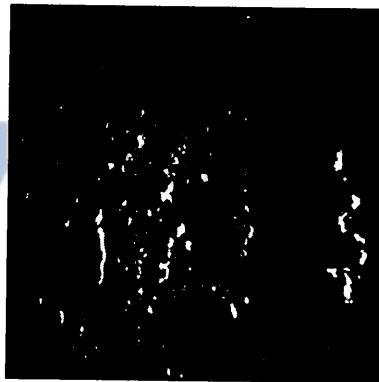
Fig.25. The film boiling of the vertical plate



(a) Frame # -3537 ( 0sec )



(b) Frame # -3512 ( 0.025sec )



(c) Frame # -3432 ( 0.105sec )

Fig.26. The film boiling of the 6° inclined downward plate (flow:▶)

### 3. 냉각 거동

막 비등 영역에 도달하자마자 히터의 출력을 끊고, 냉각 실험을 수행하였다. Fig.27, 28, 29에 히터 블럭의 온도 변화가 나타나 있다. 여러 개의 작은 알갱이들이 막 형태로 붙어 있다가 패치(patch)형태로 떨어져 나간다. 그러면서 갑자기 기포들이 커지고, Bulk boiling이 되는데, 이때의 열속이 급격히 바뀌는 것으로 보아 핵비등 영역으로 넘어간 것을 알 수 있다. 전체적인 열속을 구하지는 못했지만 시각적으로는 핵비등에서 막비등의 역과정으로 관찰되었다. 수직면에서 보면, 냉각 후 약 300sec까지 100sec당 10℃로 냉각되다가, 그 이후로 약간씩 냉각율이 커진다. 600sec 근처에서 온도가 거의 수직에 가까운 기울기로 냉각된다. 이것으로 보아, 이 지점에서 막이 떨어져나가면서 열전달이 좋아진다는 것을 알 수 있다. 그 이후부터 핵비등 영역에서의 냉각율을 보이다가 표면온도가 약 110℃이후로부터 냉각곡선이 더 완만해짐을 볼 수 있는데, 이 지점부터 단상 대류 열전달이 이루어진다고 판단된다.

하향면에서는 핵비등 영역에서 수직면과의 열전달 경향을 비교해 보면, 차이를 발견할 수 없었지만, 냉각거동은 상당한 차이를 보였다. 100sec당 10℃ 냉각율이 냉각 후 1000sec까지 지속되면서 완만한 기울기를 보인다. 약 1300sec 근처에서 갑자기 수직적인 냉각 곡선을 그린다. 핵비등으로 천이되는 시점을 보면, 수직면보다 비교적 급격한 냉각율의 차이를 보인다. 시간을 고려하지 않는다면 핵비등 영역에서 냉각경향은 수직면과 아주 비슷한 양상을 보였다.

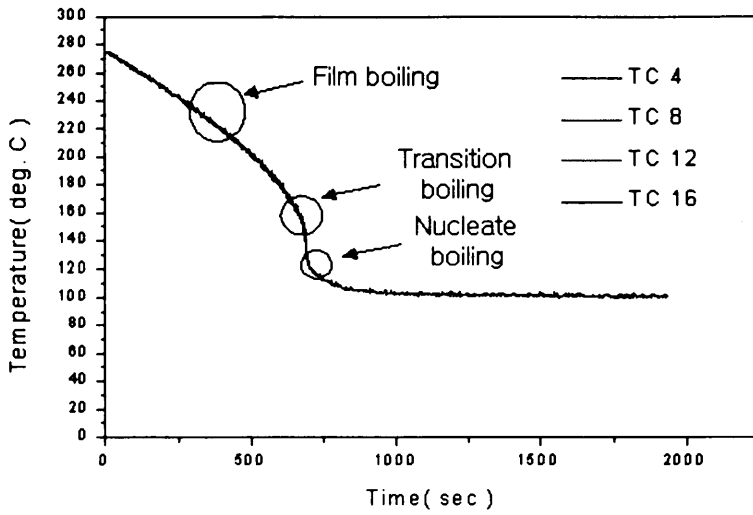


Fig. 27. Cooling curve of the vertical plate

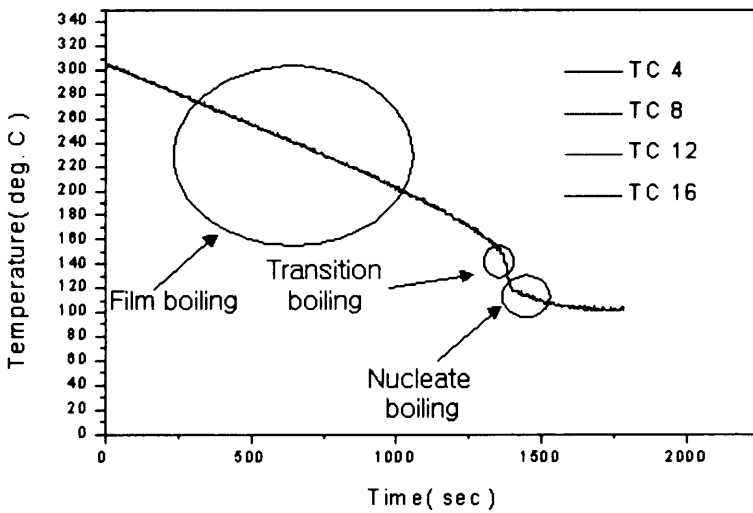


Fig.28. Cooling curve of the 6° inclined downward plate

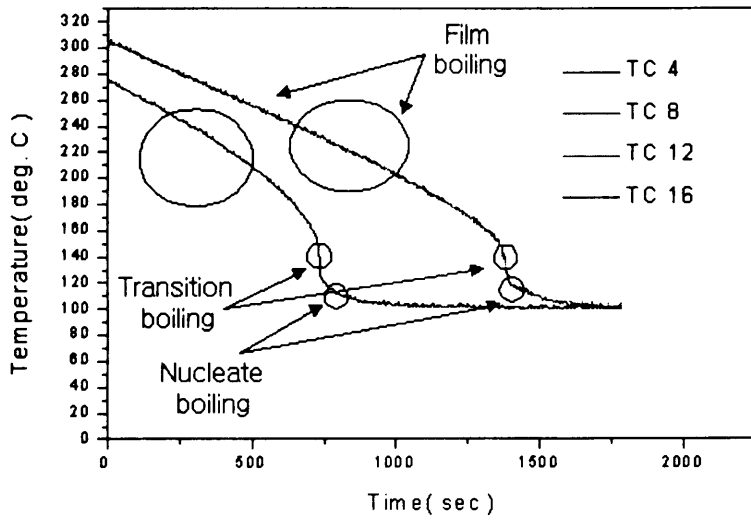


Fig.29. Comparison of the cooling curves

## IV. 결론 및 향후 과제

대기압 하에서, 수조비등실험을 통해서 가열면의 각도가 열전달에 미치는 영향 그리고, 출력과 각도에 따른 기포거동의 변화를 거시적으로 알아 보았다.

1. 약  $0.5\text{MW/m}^2$  이상의 열속에서 임계 열속에 가까울수록 가열면의 각도(수평, 수직, 하향)에 무관한 열전달 경향을 보였다.
2. 약  $0.3\text{ MW/m}^2$  이하의 낮은 열속에선 각도에 따른 열전달 경향이 차이를 보였다. 수직면과 하향면의 경우는 비슷한 경향을 보이지만, 수평면의 경우 훨씬 열전달이 잘되는 것을 알 수 있었다.
3. Rohsenow의 상관식을 사용하여, 표면의 거칠기의 영향을 대변하는  $C_{sf}$  값을 구한 결과, Nishikawa(1983)의 경우는 0.003, 그리고 본 실험은 0.0027로 나타났다.
4. Nishikawa(1983)의 경우와는 임계 열속 값이 약 20% 차이가 나지만 이는 표면 거칠기의 영향으로 볼 수 없으므로, 가열면 Geometry의 영향으로 판단된다.
5. 상향면의 경우, 출력이 증가할수록 뭉쳐지면서, 기포는 버섯 모양으로 떨어져 나가고, 기포 생성 속도는 약간씩 감소한다.
6. 수직면의 경우, 출력이 증가할수록 뭉쳐지고, 기포는 물결형태를 이루면서 생성, 소멸되고, 기포 생성 속도는 약간씩 증가한다.
7. 하향면의 경우, 출력이 증가할수록 기포모양은 작아지고, 생성속도는 거의 변화가 없다.
8. 전체적으로 약  $0.1\text{MW/m}^2$  근처의 낮은 열속에선 각도에 무관하게 Isolated bubble 형태를 보인다. 하지만 출력과 각도에 따른 다른 변화를 보이는데, 다음과 같은 표로 정리하였다.

	상향면	수직면	하향면
기포거동	Coalescent	Wavy	Elongated
열속증가시	frequency 감소	frequency 증가	frequency 변화없음.

Table.3. Result of bubbles' visualization

9. 수직면과 하향면에서의 막비등인 경우, 고속촬영을 통해 물리적 현상을 관찰 하였지만, 정밀한 막 두께 측정 및 기포와 기포사이의 wavelength를 측정을 위해 더 많은 실험이 수행되어야 할 것이다.

## V. 참고 문헌

- Bang, I. C., Baek, W. P. and Chang, S. H. 2000. A photographic study on the near-wall bubble behavior in subcooled flow boiling. *Proceedings of second japan-korea symposium on nuclear thermal hydraulics and safety, japan.*, pp.291-296.
- Bui, T. D., Dhir, V. K. 1985. Transition Boiling Heat Transfer on a Vertical Surface. *Transactions of ASME.*, Vol.107 pp.756-763
- Celata, G. P., Cumo, M. Mariani, A. and Zummo, G. 1995, Preliminary remarks on visualization of high heat flux burnout in subcooled water flow boiling, Two-phase flow modeling and experimentation, pp.859-866
- Cheung, 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.
- 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
- Galloway, J. E. and Mudawar, I. 1993. CHF mechanism in flow boiling from a short heated wall - II, Theoretical CHF model. *Int. J. Heat Transfer.*, Vol.36, pp.2527-2540
- Greitzer, E. M. and Abernathy, F. H. 1972. Film boiling on vertical surfaces.



- Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.15, pp.475-491.
- 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
- Gunther, F. C. 1951. Photographic study of surface boiling heat transfer to water with forced convection. *Trans. ASME.*, Vol.73, pp.115-121
- Hesse, G. 1973. Heat transfer in nucleate boiling, maximum heat flux and transition boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.16, pp.1611-1627.
- Howard, A. H., Gersey, C. and Mudawar, I. 1997. An analytical model for near-saturated pool boiling critical heat flux on vertical surfaces., *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.40, No.10, pp.2327-2339.
- Han, Chi-yen and Griffith, Peter 1965. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling - Part I. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.8, pp.887-904.
- Han, Chi-yen and Griffith, Peter 1965. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling - Part II. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.8, pp.905-914
- Jiji, L. M. and Clark, J. A. 1962. Bubble boundary layer and temperature profiles for forced convection boiling in channel flow. *Trans. ASME, J. Heat Transfer.*, pp.50-58

- Liang, H. S., Yang, W. J. and Vrable, D. L. 1998. Feasibility Study of immersion cooling of multi-chip modules on metal-graphite composite surfaces. *Proceedings of 11th IHTC. Korea.*, Vol.2, pp.521-526,
- Nukiyama, S. 1934. The Maximum and Minimum Values of the Heat, Q. Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmosphere Pressure. *J. Soc. Mech. Eng.(Japan).*, Vol.37. P.367
- Nukiyama, S. 1934. Experiments on the determination of the maximum and minimum values of the heat transferred between a metal surface and boiling water. *Nippon Kikai Gakkai Shi.*, Vol.37, pp.367-374
- 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
- Pitts, C. C. and Leppert, G. 1966. The critical heat flux for electrically heated wires in saturated pool boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.9, pp.365-377.
- Rohsenow, W. M. 1952. A Method of correlating heat transfer for surface boiling of liquids. *Trans. ASME.*, Vol.74, pp.967-976
- Rohsenow, W. M. 1973, Boiling in Handbook of heat transfer, McGraw-Hill, New York, pp.13-28
- Sturgis, J. C. and Mundawar, I. 1999. Critical heat flux in a long rectangular channel subjected to one-sided heating- I. Flow visualization. *Int. J. Heat Mass Transfer.*, Vol.42, pp.1835-1847

Theofanous, T. G. and Syri, S. 1997. The coolability limits of a reactor pressure vessel lower head. *Nuclear Engineering and Design*, 169, pp.59-76.

Tong, L. S., Bishop, A. A. and Efferding, L. E. 1966, A photographic study of subcooled boiling flow and DNB of Freon-113 in a vertical channel, ASME paper., 66-WA/HT-3

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.

Zuber, N. 1959. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer. AECU-4439



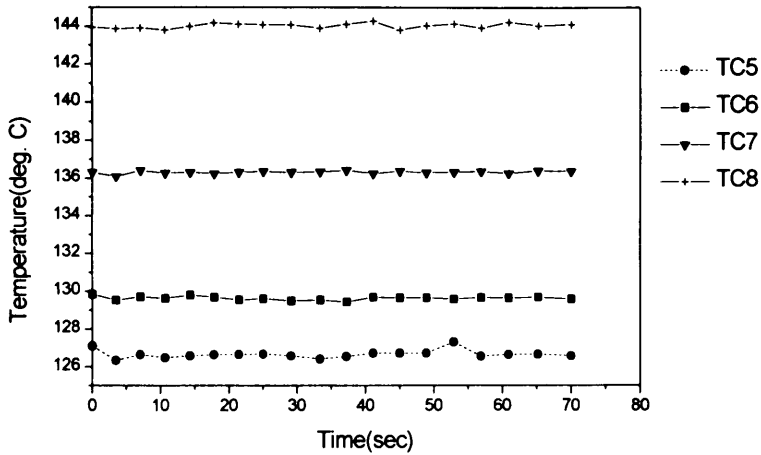
# APPENDIX

## 1. 표면 열속 및 온도 계산 예(수직면의 경우)

다음은 Power 725kW/m<sup>2</sup>에서 축 방향 온도분포이다. 열속 계산은 각 지점에서의 온도차를 이용 열속을 구하였고, 이를 평균했다. 열전대는 표면으로부터 2mm지점(TC5), 4mm지점(TC6), 8mm지점(TC7), 12mm지점(TC8)에서 측정하였다.

TC5(2mm)	TC6(4mm)	TC7(8mm)	TC8(12mm)
1.2711E+02	1.2985E+02	1.3631E+02	1.4395E+02
1.2634E+02	1.2953E+02	1.3609E+02	1.4387E+02
1.2664E+02	1.2971E+02	1.3640E+02	1.4391E+02
1.2648E+02	1.2963E+02	1.3627E+02	1.4380E+02
1.2659E+02	1.2981E+02	1.3631E+02	1.4399E+02
1.2664E+02	1.2969E+02	1.3625E+02	1.4418E+02
1.2666E+02	1.2955E+02	1.3632E+02	1.4412E+02
1.2668E+02	1.2961E+02	1.3636E+02	1.4408E+02
1.2658E+02	1.2951E+02	1.3632E+02	1.4408E+02
1.2642E+02	1.2955E+02	1.3634E+02	1.4391E+02
1.2656E+02	1.2944E+02	1.3642E+02	1.4412E+02
1.2672E+02	1.2968E+02	1.3625E+02	1.4428E+02
1.2672E+02	1.2965E+02	1.3637E+02	1.4382E+02
1.2673E+02	1.2966E+02	1.3629E+02	1.4405E+02
1.2731E+02	1.2958E+02	1.3631E+02	1.4415E+02
1.2655E+02	1.2966E+02	1.3635E+02	1.4394E+02
1.2665E+02	1.2964E+02	1.3625E+02	1.4424E+02
1.2666E+02	1.2968E+02	1.3637E+02	1.4405E+02
1.2658E+02	1.2959E+02	1.3634E+02	1.4412E+02

(단위 : °C)



Temperature curve of the vertical plate at Power=725kW/m<sup>2</sup>

1차원 열전도 방정식을 사용하였고, 열전도 계수 k는 400K(127°C)에서 구리의 물성치인 393 W/m K로 계산하였다.



TC5 : 126.58°C, TC8 : 144.12°C 일 때,

$$q'' = k(413) \frac{TC8(144.12) - TC5(126.58)}{10 \times 10^{-3}} = 724.4 \times 10^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$T_{\text{wall}} = TC5 - q'' \times (2 \times 10^{-3}) / k(413) = 123.072 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

## 2. 오차해석

물리적으로 정성적인 오차해석을 하였다. 열전대는 약 1/100의 오차범위로 열전대 설치용 구리봉에 2, 4, 4mm간격으로 T type 열전대를 설치하였다. 그리고 이는 열팽창에 따라 다소 변할 수 있다. 또한 열전대와 히터 블럭과의 공극은 은납을 사용하여 최대한 줄였다. 히터 블럭을 단열한 insulation을 통해 열 손실이 발생할 수 있다. 이와 같은 경우, 온도가 높아지고, 열전대 sheath를 통해서 전도에 의한 열 손실로 인해 온도가 낮아진다.