

제 12 장 액체 질소의 비등 열전달

1. 목 적

액체가 비등하는 모습을 핵비등(nucleate boiling)과 막비등(film boiling) 영역에서 관찰한다. 액체 질소내에 담겨져 있는 구리의 표면으로부터 핵비등 영역과 막비등 영역에 있어서의 비등 열전달 곡선(boiling heat transfer curve)을 구해본다.

2. 예습부문

(1) Heat Transfer(5th Ed.), J. P. Holman chap.9

3. 실험장치

- (1) DC power supply 2대
- (2) Oscilloscope, DMM, FG
- (3) 보온 용기
- (4) One copper piece with heater, two copper blocks
- (5) TL084, 저항및 콘덴서
- (6) A/D converter, PC/AT
- (7) T형 열전대(Cu-constantan)

4. 이 론

4.1 비등 열전달(Boiling Heat Transfer)

물을 끓이는 일은 우리 일상 생활에서 대단히 익숙한 일이다. 주전자에 물을 넣고 불(가스렌지, 전기곤로 등)위에 올려 놓고 물을 끓이는 것은 아무 두려움 없이 해낼 수 있는 극히 쉬운 일에 속한다. 그러나 원자로의 뜨거운 핵연료봉 주위에서 물이 끓는 상황을 미리 예측하고 감시할 수 있어야 한다면 어떻게 해야할까?

액체속에 담겨 있는 고체 표면의 온도가 액체의 포화 온도보다 높은 경우 액체는 비등열을 받는 만큼 기체로 바뀌게 된다. 그러나 고체 표면에서 전달되

는 열량이 많은 경우에는 표면의 온도가 액체의 포화 온도보다 높아지게 된다. 이와 같이 고체표면과 액체 사이의 온도차가 전달되는 열량의 관계를 나타내는 비등 곡선(boiling curve)은 Fig.12.1과 같은 독특한 곡선으로 표시되는 특징적인 영역이 있다.

여기에 종축의 좌표로 대류 열전달 계수 h 가 로그축에 나타나 있다. 대류에 의한 열전달은

$$q = hA(T_w - T) : \text{Newton's cooling law}$$

로 표현되는데 이때 상수 h 는 전도의 경우와 달리, 물질의 성질이 아니라 대류의 방법이나 환경에 의해 결정된다.

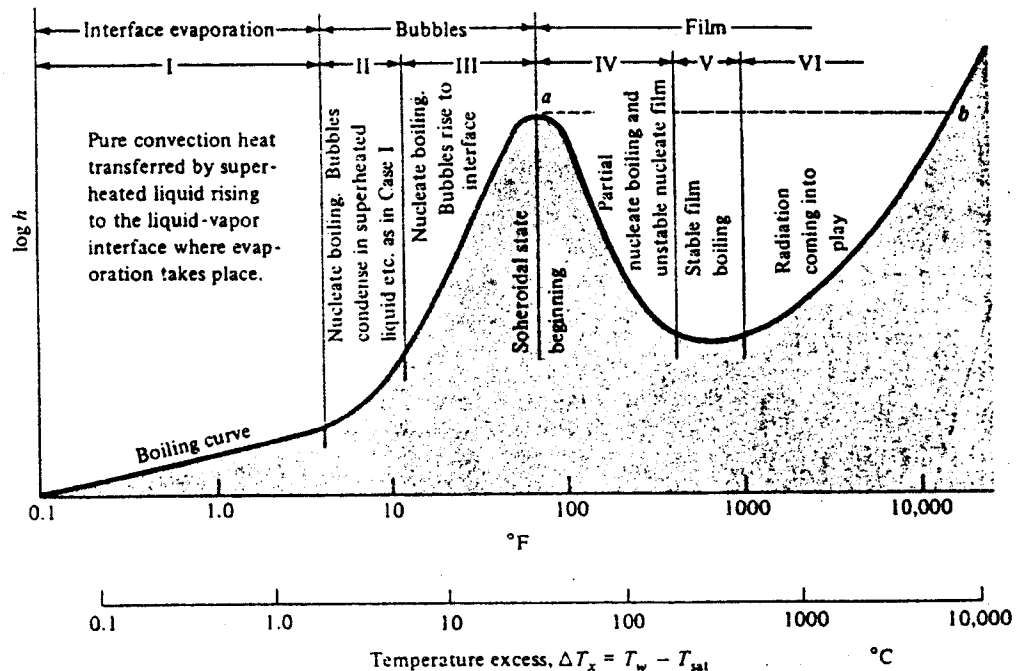


Fig.12.1 Heat-flux data from an electrically heated platinum wire, from Heat Transfer, Holman.

위의 그림은 물에 전기적으로 가열되는 백금선을 넣은 경우이다. ΔT 가 비교적 적을 때의 Region I에서는 자연 대류 현상에 의하여 고체 표면에서 뜨거워진 액체가 부력에 의하여 위로 올라간다. 끓는 현상은 구체적으로 나타나지 않는다. II영역에서는 방울이 wire 표면에 선택적으로 생기기 시작하여 이것이 곧 물속으로 사라지는 현상이 일어나는, 핵비등(核沸騰, nucleate boiling)이 시작되게 된다. 핵비등은 증발된 방울(핵)의 거동에 따라 다시 구분되며 표면에서 계속적으로 방울이 튀어 나오는 III에서는 temperature excess가 증가하고, 방울이 급속하게 발생하여, 그것이 열전달에 장애가 되어 큰 heat flux에 적은 온도차가 나타난다.



(a)



(b)



(c)

Fig.12.2 Boiling of methanol on a horizontal stream-heated cooper tube.
(a) nucleate boiling (b) transition boiling (c) film boiling

이렇게 급속히 발생한 기체 방울(bubble)이 표면에 막(film)을 형성하게 되면 (IV) 그 저항으로 대류 열전달이 잘 일어나지 않고 오히려 heat flux가 감소한다. 이것은 고체 표면이 액체와 접해 있을 때의 냉각이 기체 방울로 덮혀 있을 때에 비하여 훨씬 순조롭기 때문이다. 즉 방울로 완전히 덮혀 있으면 표면으로 부터의 열전달은 오히려 방해 받게 되는 것이다. 이러한 불안정한 상태를 거쳐서 V영역에 이르러 안정된 film boiling 상태가 되고, 그 이후에는 표면에서 가해지는 열의 복사 영향이 시작되어 다시 heat flux가 증가하는 과정을 나타낸다. Fig.12.2는 각 영역의 boiling 특성을 사진으로 보여준다.

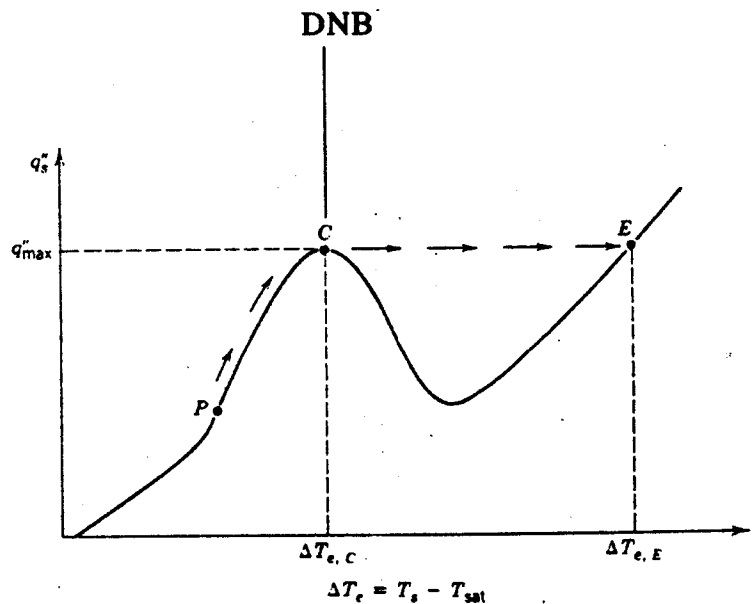
4.2 비등 열전달의 영역 바뀜

고체 표면이 액체에 완전히 잠겨있는 잠김 비등 조건에서 고체 표면의 온도가 차차 높아지면 어떤 현상이 일어나게 될 것인가?

고체 표면의 온도가 높아지면 열전달율이 늘어나게 되는 것은 그 반대로 일정량의 열전달을 일어나게 하기 위해서는 필요한 만큼의 온도차가 발생한다는 것을 뜻한다. 우리의 경험과 일치시키기 위하여 주전자에 물을 끓이는 경우를 예를 들면 불이 세지 않을 때에는 물이 끓을 때 주전자와 불이 만나는 바닥 표면의 온도가 그다지 높지 않으나 매우 센 불위에 놓았을 때는 물이 끓는 온도는 일정하지만 주전자 바닥의 온도가 상대적으로 높아진다는 것을 뜻한다.

다시 원자로의 반응로에서 핵 연료봉 주위의 물을 생각해 보면 우리의 목표는 물을 데우는 것이므로 주어진 연료봉 표면적에 대하여 가능한 많은 양의 열을 방출시키는 것이 바람직 하다.

그러나 열을 많이 방출시키려면 표면의 온도가 상승하게 되며 자연 대류 및 핵 비등 단계를 넘어서는 순간 더 이상 핵 비등 상태에 있지 못하는 현

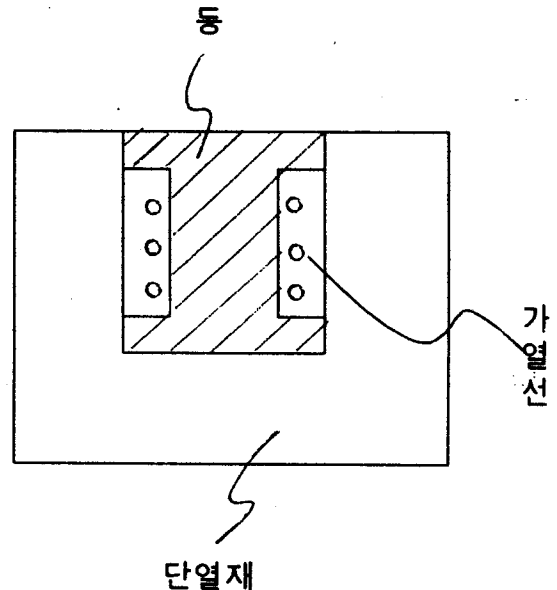


Heating-Up 과정

상(departure from nucleate boiling)이 일어나게 된다. 이 때에는 열전달량은 늘어나지 않으나 표면의 온도가 갑자기 증가해버리는 (고체의 용융점 이상으로도 쉽게 올라가며, 핵 연료 봉의 용융 파괴에까지 갈 수 있다.) 심각한 변화가 일어나게 된다. 따라서 DNB는 곧 고체표면의 파손에 까지 순간적으로 이어지는 위험한 상태이므로 공각적으로 주의깊게 관찰하여야 하는 것이다. 우리의 실험에서도 이 상태에 근접한 조건에서 측정을 하게 되지만 DNB는 곧 실험편의 파괴를 의미하므로 주의깊게 방지하도록 세심한 신경을 써야 한다.

4.3 열손실의 계산

가열실험의 경우 표면에서의 비등 열전달을 실험하기 위해 그림과 같은 시험편을 사용한다. 이 시험편을 액체 질소에 잠근 후 가열선에 전류를 가하면 동 부분의 온도가 상승하게 되고 전류를 일정하게 유지한 채 놓아두면 시간에 따라 변하지 않는 평형상태에서 온도가 유지되어 멈추게 된다. 이 때에 열발생 및 손실을 고려하면,



$$V \cdot i - Q_s(T) - Q_1(T) = 0$$

V : 전원의 전압

i : 전류

$Q_s(T)$: 위 표면을 통하여 액체로 전달된 열량

$Q_1(T)$: 단열재를 통하여 액체로 전달된 열량

만약에 $Q_1 \ll Q_s$ 인 경우라면 우리는 쉽게 열 발생량과 표면 비등 열전달량이 같다고 생각할 수 있다.

열손실의 개략 계산

열손실을 간단히 계산하기 위하여 반경 방향과 축 방향을 각각 나누어 계산한다 (자세히 계산하려면 축대칭 2차원 문제가 되어 비교적 복잡한 문제가 된다)

(i) 반경 방향

$$Q_r = -kA \frac{dT}{dr}$$

$$= -kA 2\pi l_1 r \frac{dT}{dr}$$

Q_r 은 r 위치에 관계없이 일정하여야 하므로

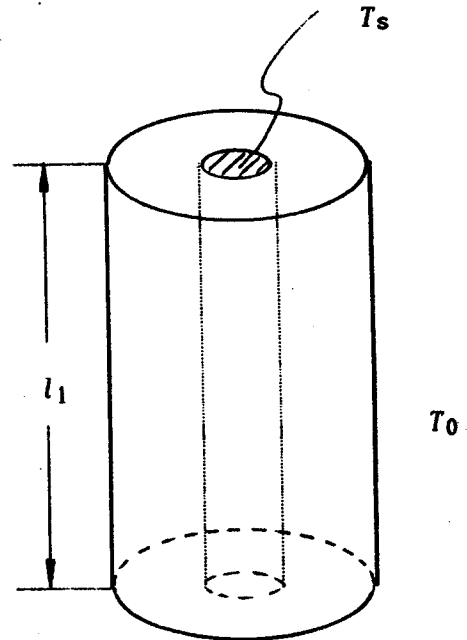
$$Q_r \int_a^b \frac{dr}{r} = -2\pi l_1 \int_{T_s}^{T_o} k dT$$

여기에서 열전도도 k 는 일정하다고 가정하면,

$$Q_r \ln \frac{b}{a} = -2\pi l_1 k (T_o - T_s)$$

$$Q_r \approx \frac{2\pi l_1 T_o \cdot k}{\ln b/a} \left(\frac{\Delta T_s}{T_o} \right)$$

수치 계산을 위하여 $l_1 = 15 \text{ mm}$, $b/a = 2$, $T_o = 77 \text{ K}$, $\Delta T_s = 20 \text{ K}$, $k = 0.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 라고 하면 $Q_r = 0.5 \text{ W}$ 가 된다.

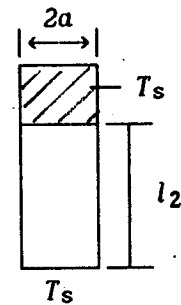


(ii) 축 방향

$$Q_z = -kA \frac{dT}{dz}$$

$$= -k\pi a^2 \frac{T_o - T_s}{l_2}$$

$$Q_z = \frac{\pi a^2 k T_o}{l_2} \cdot \frac{\Delta T_s}{T_o}$$



수치 계산을 위하여 $l_2 = 10 \text{ mm}$, $a = 6.5 \text{ mm}$, $k = 0.2 \text{ W/mK}$, $T_o = 77 \text{ K}$, $\Delta T_s \approx 20 \text{ K}$ 라고 하면 $Q_r = 0.05 \text{ W}$ 가 된다.

실험 12 : 액체 질소의 비등 열전달

1. Experimental Set up

(1) Signal Conditioner 회로를 아래와 같이 구성

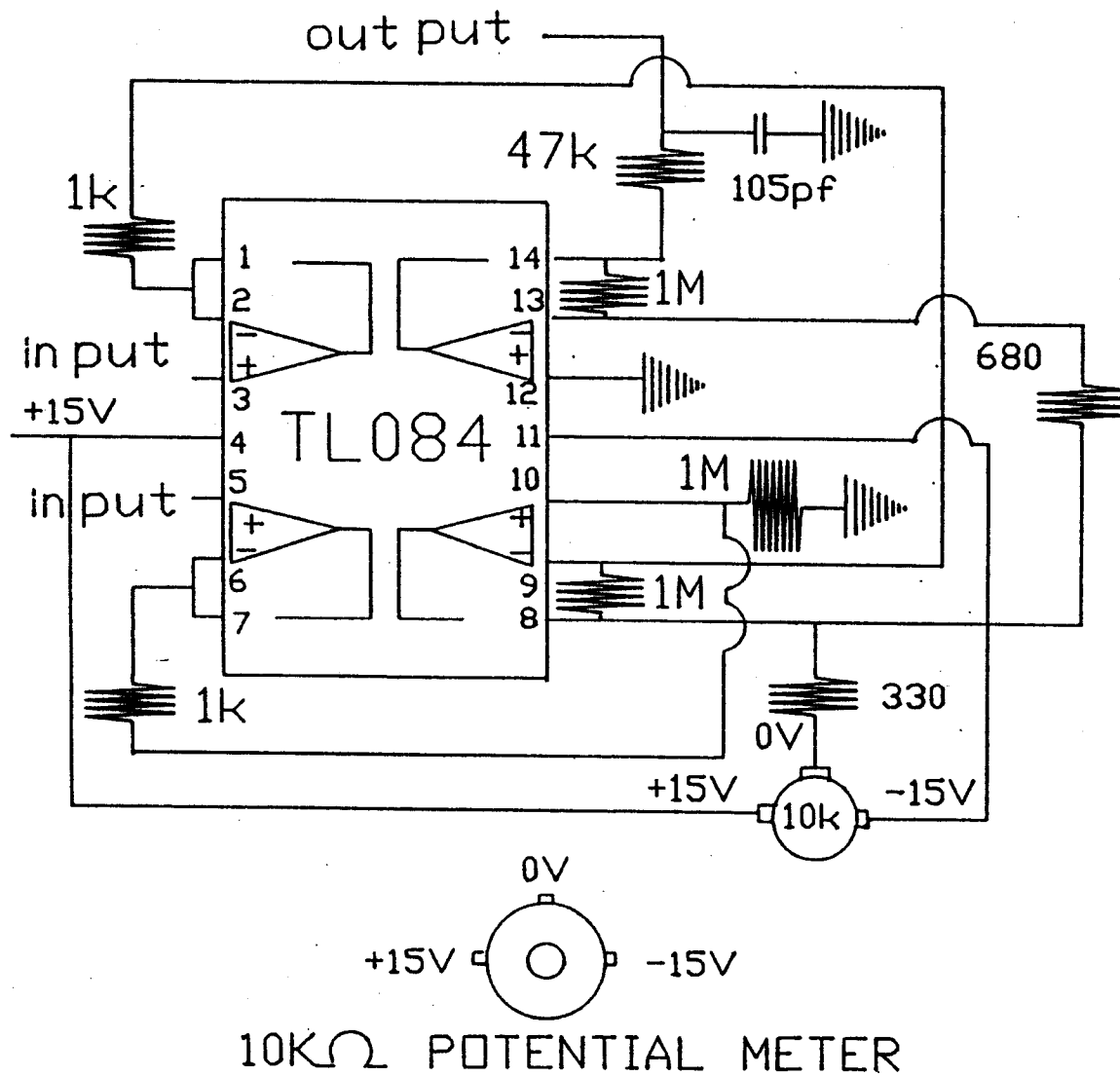


Fig.12.3 Signal Conditioner 회로도

(2) TL084의 3번과 5번이 입력 단자이다. 이 두 input 단자를 ground시키고 output 단자에 0 Volt가 출력되도록 가변 저항기를 조정한다.

(DMM Oscilloscope 사용) (DC 50mV/Div)

(3) 조정이 끝나면 Signal Conditioner에 Thermocouple을 연결한다.

2. Heating in the nuclear boiling regime(Fig.12.4) Type 'T' thermocouple

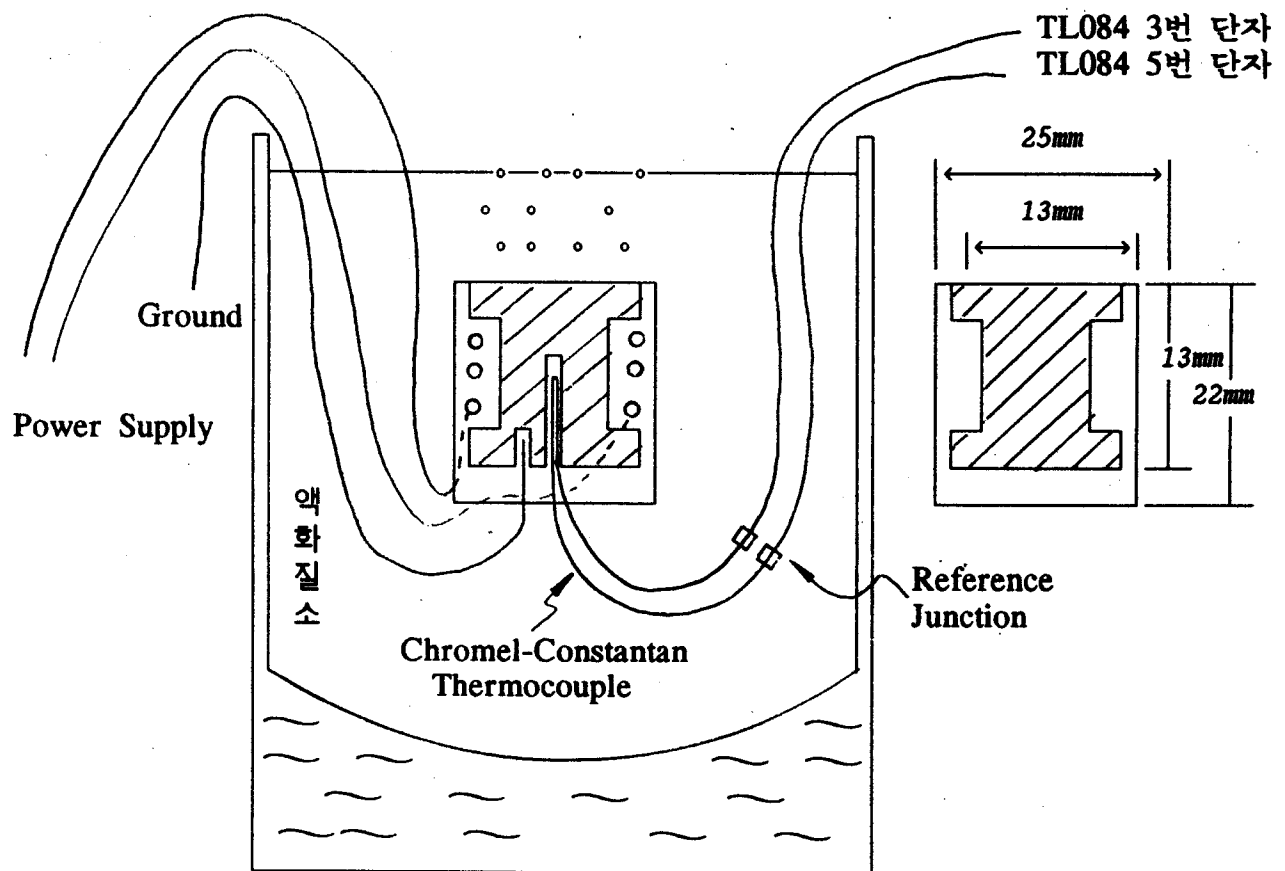


Fig.12.4 Heating in the nuclear boiling regime

(1) Heater를 액체 질소 속에 넣고 Heater의 T-C(Thermocouple)단자를 Signal Conditioner의 Input단자에 연결하고 Heater를 LN₂속에 담근다. 이때 Signal Conditioner의 Output이 '0'이 되는가를 DMM이나 Oscilloscope로부터 확인한다. 이 때의 Heater의 저항을 측정한다. (약 50Ω)

(2) Oscilloscope를 X-Y mode에 놓는다. (intensity를 약하게 할 것.)

x input : signal conditioner의 output단자. 50mV/DIV range

y input : Heater의 전압단자. 5V/DIV range

* screen 상에서 'dot'가 좌측 하단에 위치하도록 한다.

(3) DMM은 Volt mode로 하여 signal conditioner의 output단자와 연결한다.

(4) Heater의 power supply voltage를 25Volts까지는 매 5Volts씩 올리고 28V부터는 1Volt씩 올리면서 steady 상태가 될 때까지 기다리고 Heater의 power supply voltage와 DMM의 voltage를 기록한다.

(5) DMM에서 T-C의 output voltage가 급격히 증가할 때 즉 scope상에서 x 축으로의 증가량이 급격할 때는 재빨리 Heater의 power supply를 off시키고 그 때의 값을 기록한다. (power supply를 off시키지 않으면 지독한 냄새와 함께 Heater가 타게 된다.)

* 이 때의 power supply voltage는 대략 32Volts 정도이다.

3. Data Acquisition System 조정

(1) ADC-DATA.BAS를 load시킨후 list해본다.

(2) 첨부된 program과 같이 ADC-DATA.BAS의 1040과 1050사이에

```
1045 FOR J=1 TO 800
1046 NEXT J
```

와 같은 program을 추가시킨다. 이때는 DATA를 1초 간격으로 받아들이기 위함이다. 또한 DATA를 150개 받아 들이도록 program을 수정한다.

* 원래의 DATA Sampling time은 0.001914초이다.(실험4 참고)

4. Cooling through the film Boiling and Nucleate Boiling regimes

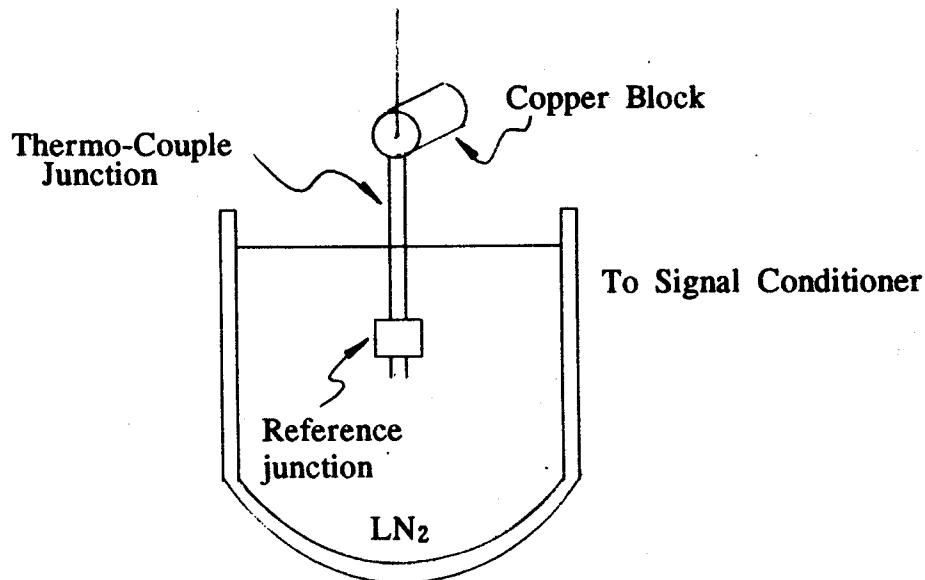


Fig.12.5 Cooling through the film Boiling and Nucleate Boiling regimes

- (1) 먼저 얇은 copper block의 T-C output을 signal conditioner input에 연결하고 output을 A/D input, DMM, scope에 연결한다.(DMM : 20V Range scope 2V/DIV range)
- (2) 3번에서와 같이 수정한 ADC-DATA.BAS를 load시킨다.
- (3) Reference Junction을 LN₂에 잠시 담궈둔다.
 - * 이유는 각자 생각해 본다. 이때 DMM와 scope의 변화를 관찰한다. 만약 Voltage가 나오면 signal conditioner에 input된 T-C output 단자를 바꾸어 쏜다.
- (4) copper block을 LN₂에 담금과 동시에 ADC-DATA.BAS를 RUN시킨다.
- (5) 결과를 File에 저장한다.
- (6) 두꺼운 copper block에 대해서도 위의 실험을 반복한다.
 - * film boiling regime이 계속되다가 마지막 순간에 잠깐 동안 nucleate boiling regime이 나타나는데 이 순간을 놓치지 않도록 주의한다.
- (7) NITR01.BAS를 LOAD시킨후 RUN시킨다. 이때 Data File을 요구할 것이다. 그러면 (5)에서 저장시킨 File name을 입력한다.
- (8) 첨부된 graph와 같이 온도가 갑자기 떨어지는 부분을 발견할 것이다.

Large Copper Block

V_{TC}	C	dT_s/dt	Q	q	T	T_s	$\log T_s$	$\log q$

q 對 T_s 를 $\log\text{-}\log$ scale로 plot한다.

※ (1), (2) graph는 한장의 graph에 그린다. 기대하는 곡선이 얻어지는가?

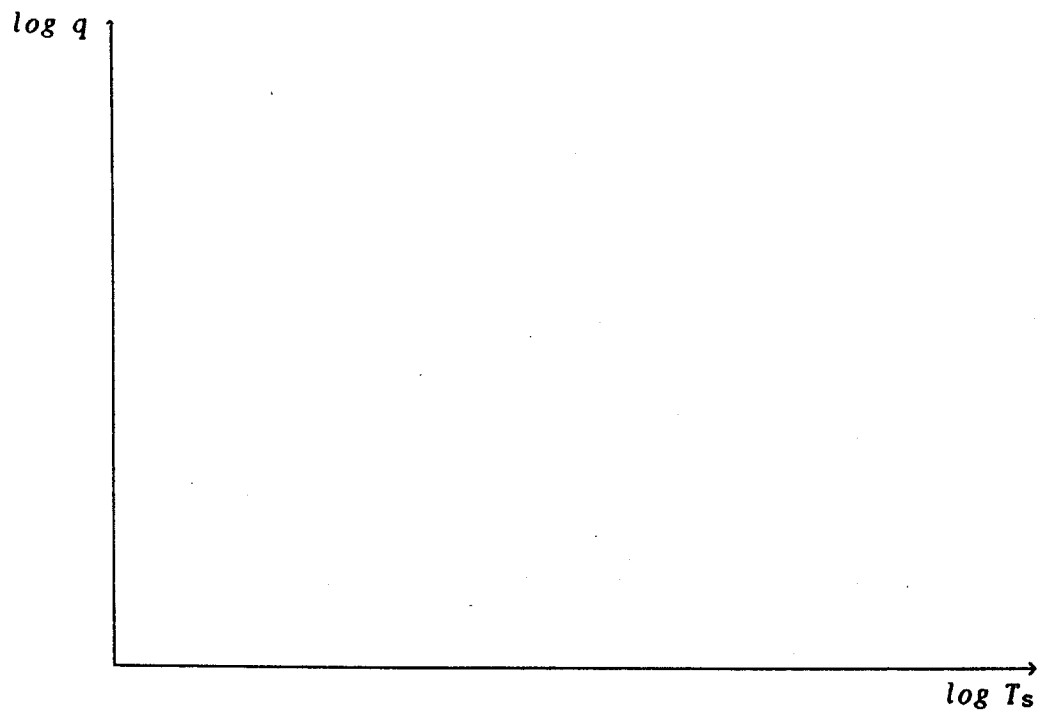


TABLE 12.1 Specific Heat of Copper*

T(K)	C(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	T(K)	C(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
0	0	120	288
4	0.091	140	313
10	0.86	160	332
20	7.7	180	346
40	60	200	356
60	137	250	374
80	205	300	386
100	254		

* Based on Specific Heats and Enthalpies of Technical Solids at Low Temperatures, NBS Monograph 21 (October 1960).

ADC-DATA.BAS

```

1000 CLS
1010 DIM V1(256),V2(256),V3(256)
1020 Y=15
1030 PRINT "ch ";Y
1040 FOR I=1 TO 256
1050 OUT &H220,Y
1060 A=INP(&H220)
1070 IF A>=128 THEN 1080 ELSE 1060
1080 V1(I)=INP(&H221)
1090 V2(I)=INP(&H221)
1100 NEXT I
1110 PRINT:PRINT:PRINT "***** completed!!"
1115 PRINT:PRINT :PRINT
1120 FOR I=1 TO 256
1130 VALUE=V1(I)*16+V2(I)/16
1140 VOLT=(VALUE-2048)/2048*5
1150 V3(I)=VOLT
1160 PRINT I,VALUE,VOLT
1170 NEXT I
1180 REM *****
2000 PRINT "type output file name"
2010 INPUT D$
2020 OPEN D$ FOR OUTPUT AS #1
2030 FOR I=1 TO 256
2040 PRINT #1,V3(I)
2050 NEXT I
2060 END

```

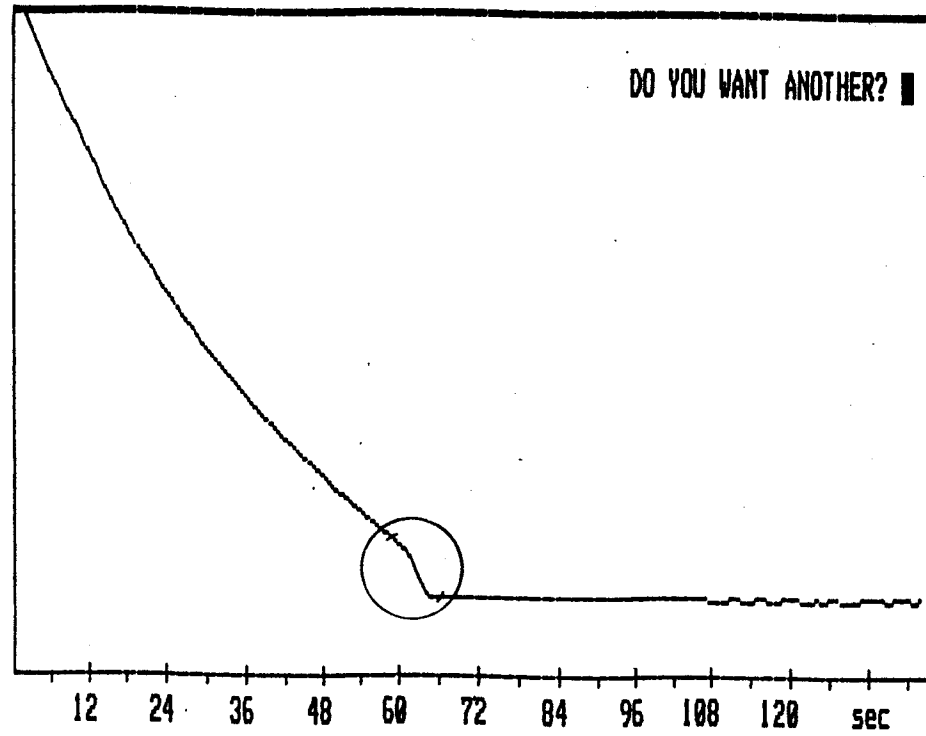
NITROL.BAS

```

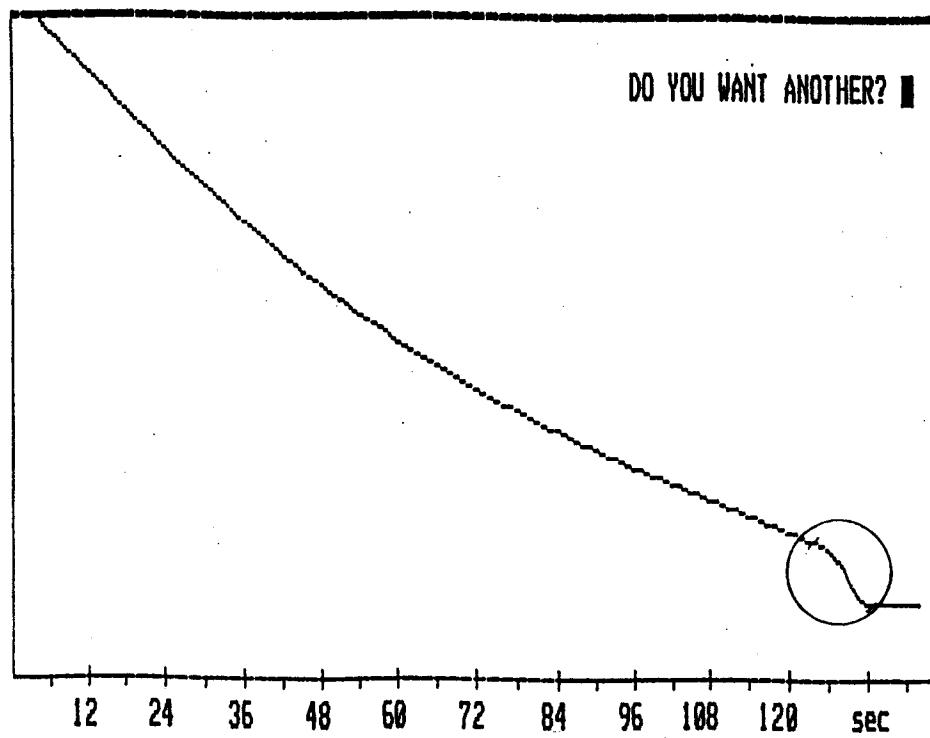
1000 CLS:BEEP
2000 SCREEN 2
3000 KEY OFF
4000 DIM TEMP(256)
5000 CLS:BEEP
6000 PRINT "INPUT YOUR DATA FILE NAME"
7000 INPUT A$
7100 PRINT:PRINT:PRINT
7600 TIME=1
8000 OPEN A$ FOR INPUT AS #1
10000 FOR I=1 TO 150
11000 INPUT#1,TEMP(I)
12000 NEXT I
13000 CLOSE#1
19000 CLS
20000 LINE(10,2)-(10,170)
21000 LINE(10,170)-(580,170)
22000 LINE(580,170)-(580,2)
23000 LINE(580,2)-(10,2)
23050 LINE(580,1)-(10,1)
23100 FOR I=1 TO 23
23110 J=I*24+10
23120 LINE(J,170)-(J,172)
23150 NEXT I
23152 FOR I=1 TO 11
23153 K=I*48+10
23154 LINE(K,168)-(K,172)
23155 NEXT I
23190 LOCATE 23,67 :PRINT"sec"
23200 FOR I=1 TO 10
23205 K=I*12:TIME1=TIME*12*I
23210 J=I*6 :LOCATE 23,J:PRINT USING"###":TIME1
23500 NEXT I
26000 FOR I=1 TO 140
27000 TEM1=INT(TEMP(I)*30)
29000 X1=4*I+6
30000 Y1=150-TEM1
30100 X2=X1+4:TEM2=INT(TEMP(I+1)*30): Y2=150-TEM2
31000 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
35000 NEXT I
36000 LOCATE 3,50 :PRINT "DO YOU WANT ANOTHER"
37000 LOCATE 3,69
38000 INPUT A$
39000 IF (A$="y")OR(A$="Y")THEN GOTO 5000
40000 SCREEN 0,0,0
40100 END

```

참고 Cooling Experiment의 예



(a)



(b)