

論 文

피복된 傳熱面에서의 沸騰特性

(大氣壓 以下の 壓力에서)

文 大 榮* · 吳 壽 喆** · 任 將 淳***

Behavior of boiling heat transfer at coated heating surface (In the range of subatmospheric pressure)

D.Y. Moon., S.C. Oh., C.S. Yim

This paper describes an experimental investigation which has been carried out with distilled water with the range of heat flux and pressure covering 7,400-28,000kcal/m²h and 0.42-1.0332kg/cm²abs, respectively.

In this experiment, Nickel coated mirror surface heater of 5cm O.D. was used as a heating source.

The conclusions summarized as follows;

1. The useful correlation of the test data for the heat transfer coefficient is presented as a function of the pressure.

$$\alpha/\alpha_s = c \times p^{0.18}$$

where α is the heat transfer coefficient and α_s is the heat transfer coefficient at atmospheric pressure and p is the pressure, C is constant.

2. The bubble diameter near the heating surface and rising velocity increased with the heat flux.

3. A decrease in pressure results in the decrease of the number of nucleation sites and the increase of the bubble volume.

4. Bubble rising velocity differences are increased maximumly up to 200% of that at atmospheric pressure.

記 號

d_b : bubble diameter (mm)
 Q : total heat transfer rate (kcal/h)
 q : heat flux (kcal/m²h)
 V_s : bubble rising velocity (mm/sec)
 N_s : number of nucleate (個)
 p : pressure (kg/cm²abs)
 ΔT : $T_s - T_w$ (°C)
 A : area of heating surface (m²)

α : heat transfer coefficient (kcal/m²h°C)

α_s : heat transfer coefficient at atmospheric pressure (kcal/m²h°C)

T_s : temperature of heating surface. (°C)

T_w : saturation temperature of water (°C)

C : constant

1. 緒 論

沸騰熱傳達에 關한 本格的인 研究는 約 20年 前부터 시작되었으며 特히 近來에 와서는 原子力利用과 宇宙工學의 發達을 계기로 하여 이에 대한 進展度는 더욱 加速化되어 가고 있는 實情이다.

*正會員, (株)大成産業

**仁荷工業專門學校

***正會員, 慶熙大學校

그러나 현재까지 發表한 論文(1, 2, 3)들을 살펴 볼 때 減壓下에서의 傳熱現象에 대한 研究는 극히 드물며 따라서 本研究에서는 실제의 각종 熱交換器에서 부닥치고 있는 大氣壓以下일 때의 傳熱效果의 特性을 밝히고자 한다.

一般的으로 壓力이 變化할 때의 沸騰現象은 發生氣泡의 크기 및 上昇速度, 氣泡發生點數, 氣泡核 등에 의해서 영향을 받는다.

本實驗에서는 이와같은 主된 因子의 상호관계를 규명코저 한다.

Nisikawa(4)는 $p=0.4, 0.7, 0.9, 1.0333\text{kg/cm}^2$ 의 大氣壓 以下の 壓力에서 $9,000 \sim 30,000\text{kcal/m}^2\text{h}$ 熱流束 범위내에서 실험을 하였으며 이 結果 氣泡의 直徑은 增大하나 發生頻도와 傳熱量은 낮아진다고 하였다.

Rallis(5), Cole(6) 등은 壓力이 減少해 감에 따라 熱傳達係數는 減少한다고 지적하였다.

本實驗에서는 被覆(Nickel 도금)된 傳熱面을 使用하여 鏡面화된 表面條件에서의 減壓에 따르는 沸騰特性을 實驗的으로 규명코저 한다.

2. 實 驗

2-1. 實驗裝置

本實驗用 沸騰容器(Fig.1)는 stainless steel 板으로 $30\text{cm} \times 20\text{cm} \times 25\text{cm}$ 直方體로 만들고 外側에 外筒을 둘러쌓게 하였다.

沸騰容器內筒과 外筒사이는 熱損失을 最小로 하기 해위 斷熱材(glass wool)로 充填시켰으며 容器에 대응하는 可視窓을 設置하여 사진촬영 및 沸騰現象을 관찰할 수 있게 하였다.

容器內部에는 補助加熱器($250\text{W} \times 2$)를 설치하여 沸騰液體의 탈기 및 예열시키는데 사용하였다.

本實驗에서는 沸騰液體로서 蒸溜水를 사용하였으며 減壓實驗中 容器內部的 水位를 一定하게 유지시키기 위해 condenser(水冷式)에서 응축된 물은 다시 容器內部로 환원시켰다.

傳熱面表面은 동판에 Ni 도금을 하였으며 Fig. 2와 같이 이 銅板 밑에서 운모판(두께 0.02,

50mm ϕ)과 석면판(두께 8, 50mm ϕ)사이에 heater 를 끼우고 이것을 장착하였다.

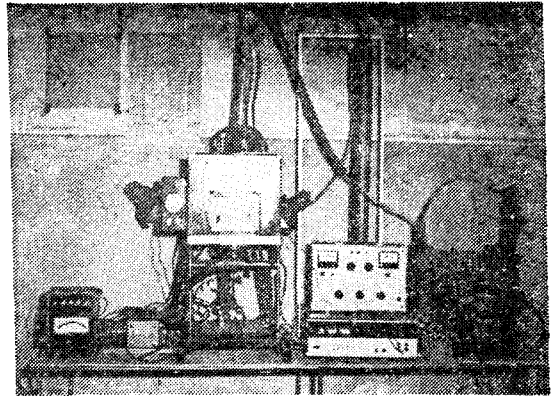


Photo. 1. Experimental Equipment

2-2. 溫度測定

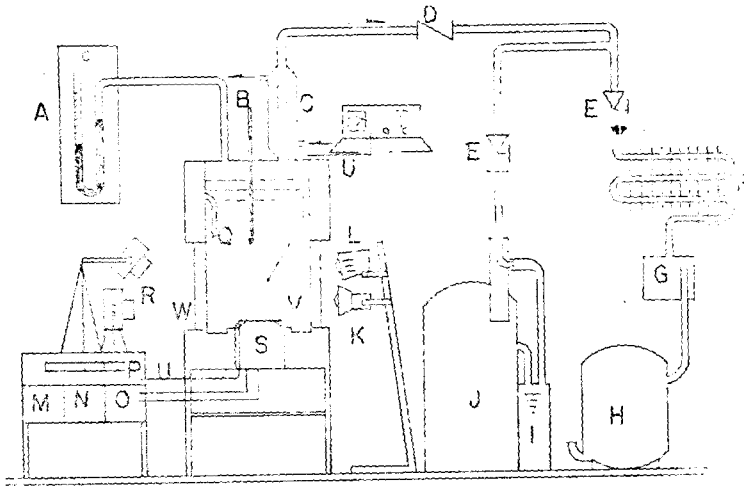
傳熱面表面의 面溫度測定은 Fig.2와 같이 銅板 上의 2點에 C-C 熱電對(0.1mm ϕ)를 밑에서부터 插入하여 Amalgam 을 써서 傳熱面 表面으로부터 約 0.5mm 程度 밑에 固着시킨 다음 表面의 溫度를 計測하였다. 이때 起電力의 測定은 Digital Volt meter (Yokogawa Co. Model 2501) 를 使用하였으며 특히 表面의 2點의 溫度測定에 있어서는 計測에 의한 오차를 最小限으로 줄이도록 留意하였으며 최종 表面溫度로서는 이 2點의 平均値를 취하였다.

液體主流의 溫度는 標準水銀溫度計와 傳熱面에서 위로 5cm 떨어진 곳에 자리잡은 C-A 熱電對(0.3mm ϕ)를 사용하였으며 이때의 起電力은 精密型 Potentiometer (Yokogawa Co. type 2727)을 사용하여 측정하였다.

2-3. 減壓裝置

容器內部를 大氣壓以下로 減壓시키기 위해서 本實驗에서는 Compressor(1/2No)와 Water pump(한일자동 pump, Model 406)을 Fig.3과 같이 裝着하여 진공發生기구를 만들었다.

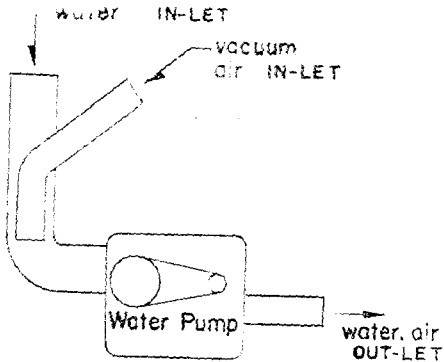
0.7ata 까지의 減壓은 Water pump 만을 利用하여 大氣壓에서부터 減壓시켰으며 그 以下の 壓力강하를 할 때는 Compressor 를 써서 0.76~0.42 kg/cm^2 까지 減壓시켰다.



A: mercury manometer B: standard precision thermometer C: condenser(water) D: check valve E: glove valve F: condenser(air) G: surge tank H: vacuum pump I: water tank J: water pump K: auxiliary light L: brom light M: transformer N: volt meter O: ammeter P: precision digital volt meter R: camera S: heating element T: potentiometer Q: pre heater U: ocouple V: silicon rubber W: window

Fig. 1. Sketch of Experimental Apparatus

Compressor 를 가동할 때 Compressor 내에 습증기가 들어가는 것을 방지하기 위해 發生된 습증기를 Condenser(Air fin type)와 Surge tank 로 유도하여 습기를 제거토록 하였으며 이 蒸氣는 다시 완전히 응축시켰다. 減壓은 18~20mmHg/min 의 속도로 하였다. 또한 Check valve 를 설치하여 容器內部를 減壓할 때 Water pump 와 Compressor 에서 각각 물이나 공기가 逆流하는 것을 방지하였다.



- 1) Rock wool 2) Asbestos Flat Plate 3) Ni-cr wire
- 4) Cylinder 5) Glass wool 6) Copper plate 7) Pin hole

Fig. 2. heating elements

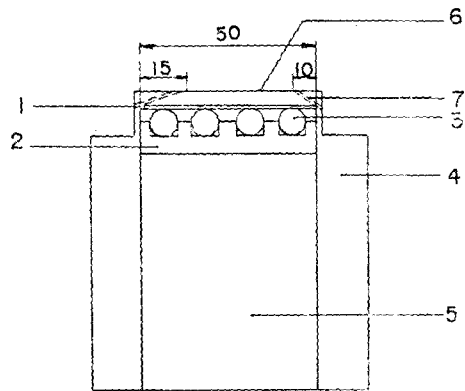


Fig. 3. pressure reducing apparatus

2-4. 사진촬영

沸騰現象의 사진촬영은 2臺의 Camera(NI-KON and ASAHI-PENTAX)를 사용하여 촬영하였다.

촬영조건은 기포의 上昇速度는 조리개 f : 8, Time : 500, 氣泡의 發生核點數 및 크기는 조리개 f : 8, Time : 60, (Film ASA 100), 그리고 조명은 Brom light(500W)와 補助 light (250W×2)를 사용하였다.

그리고 촬영된 Film 은 Micro-Reader (KO-DAK)를 이용하여 25배 확대시켜 각 기포의 舉動을 調査分析하였다.

2-5. 實驗方法

沸騰容器와 傳熱面은 깨끗하게 세척하여 건조시킨 후 蒸溜水를 約 1,300cm³ 程度 담고 傳熱面으로부터 液體自由表面까지의 높이는 約 22cm 가 되게 하였다. 이때 實驗期間 동안의 水位가 一定하게 維持되도록 하기 위하여 發生蒸氣를 응축시켜 환유하도록 하였다.

蒸溜水는 補助 heater 로 約 1.5時間 加熱시켜서 蒸溜水內에 포함된 氣體를 除去시킨 후 다시 自然冷却시켜서 實驗을 시작하였다.

液體의 溫度는 所要壓力에서의 포화온도 근처까지 가열시키면서 傳熱面 表面溫度를 동시에 가열토록 하였다.

그리고 壓力은 大氣壓으로부터 시작하여 徐徐히 감소시켰다.

定常狀態에서 沸騰이 開始되면 補助 heater 는 끄고 各部의 溫度를 測定하였으며 동시에 兩側에 設置된 可視窓을 通하여 撮影을 하였다.

특히 減壓時에는 沸騰器를 Bolt 로서 조인 다음 완전히 密閉되게 하였다.

實驗條件에서 熱流束을 바꾸며 그때마다 傳熱面表面은 蒸溜水와 Acetone 을 써서 부드러운 솔로 깨끗하게 세척한 후 건조시켜 사용하였다.

實驗은 熱流束을 一定하게 하여 壓力(1,033~0.42kg/cm²)을 低下시키면서 進行하였다.

그리고 熱流束은 7.4×10³~2.8×10⁴kcl/m²h 의 범위내에서 變化시켰다.

3. 實驗結果 및 考察

氣泡의 發生點數, 氣泡의 上昇速度 및 氣泡의 크기 등은 撮影한 사진을 分析하여 沸騰에 대한 解析을 하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 熱流束과 壓力에 대한 氣泡發生點數의 關係를 表示하며 各熱流束마다 減壓에 따르는 發生點數는 減少하고 있으며, 또

同一壓力에서는 熱流束이 增加할수록 增大하고 있음을 나타내고 있다.

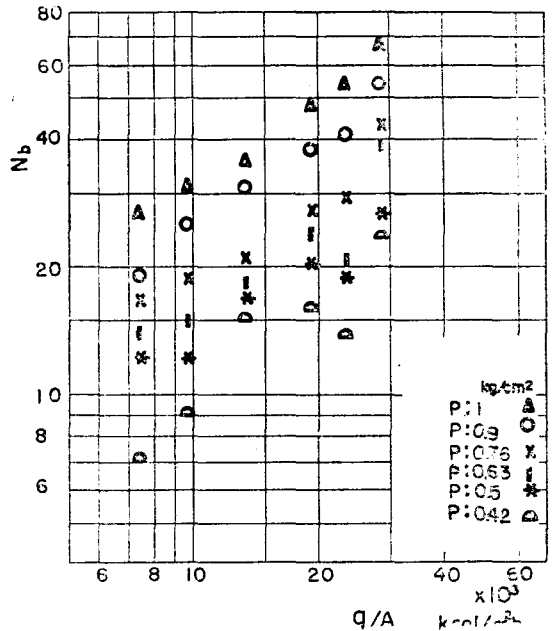


Fig. 4. number of nucleate site versus heat flux

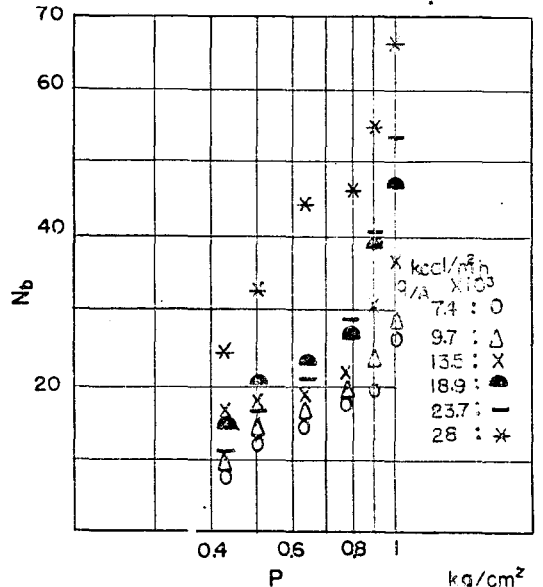


Fig. 5. number of nucleate site versus pressure

그런데 本實驗의 壓力變化 範圍에서는 發生點數의 增加狀態는 熱流束이 높을수록 그의 增加量이 크다는 것을 나타내고 있다. 例示하면 q=7,400kcal/m²h 일 때의 Nb의 增加量은 20程度

이고, $q=28,000\text{kcal/m}^2\text{h}$ 에서는 43이 되며 最小와 最大熱流束간에서는 約 2배의 增加를 가져 온다는 것을 알 수 있다.

이것은 表面 凹凸部가 미소하기 때문이며 NISHIKAWA의 論文結果는 0.4ata에서 3個, 0.7ata에서 9個, 1.0332ata에서 19個 程度이다

Fig. 6은 溫度差 ΔT 에 대한 q/A 의 變化를 나타내는 沸騰曲線으로서 壓力이 낮아짐에 따라 熱傳達係數는 減少하는 傾向이 나타나고 있는데 이것은 NUKIYAMA의 理論과 잘 一致한다.

(8)

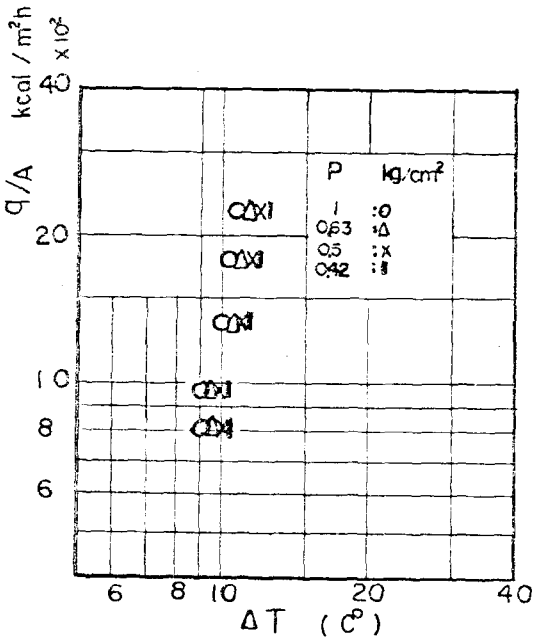


Fig. 6. heat flux versus temperature difference

그러나 本實驗 범위내에서는 減壓에 따른 ΔT 의 變化量은 大氣壓 以上에서의 그 값보다(7) 變化量이 적어지는 것을 알 수 있다.

또한 壓力이 減少하면 大氣壓때보다 α 의 값이 不規則하게 變化하는데 이는 氣泡發生이 減壓下에서는 不規則的으로 發生하는데 기인된다고 사료된다.

Fig. 7은 熱流束에 대한 傳熱面으로부터 이탈한 직후의 기포직경에 대한 變化를 각 壓力에 대해서 表示한 것이다.

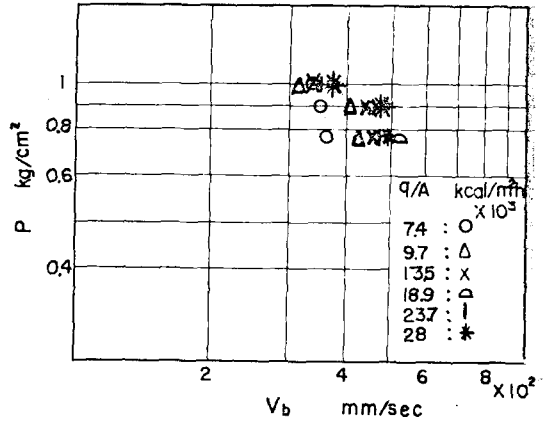


Fig. 7. bubble diameter versus pressure

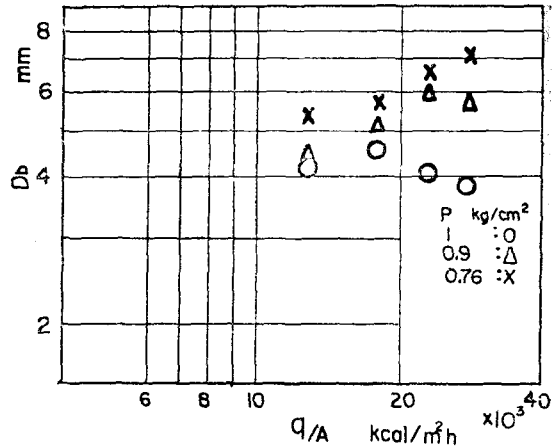


Fig. 8. pressure versus bubble rising velocity.

氣泡直徑은 壓力이 0.9ata와 0.76ata에서는 熱流束이 增加하면 增加하는 傾向이 있으나 大氣壓下에서는 거의 變化하지 않는 것으로 나타난다.

또한 기포직경은 減壓될수록 커지는 것이 보이며, 대기압에서의 기포직경에 비해 變化폭은 熱流束이 增加할수록 크게 되는 것을 알 수 있다.

photo(2)에서 볼 수 있는 바와 같이 壓力이 저하하면 傳熱面을 이탈할 때의 기포의 직경이 증가하고, 동시에 液體內를 기포가 上昇하는 동안에 기포가 커지는 比率도 增加하는 것이 나타난다.

즉 減壓을 하면 기포는 전후 左右로 渦動하면

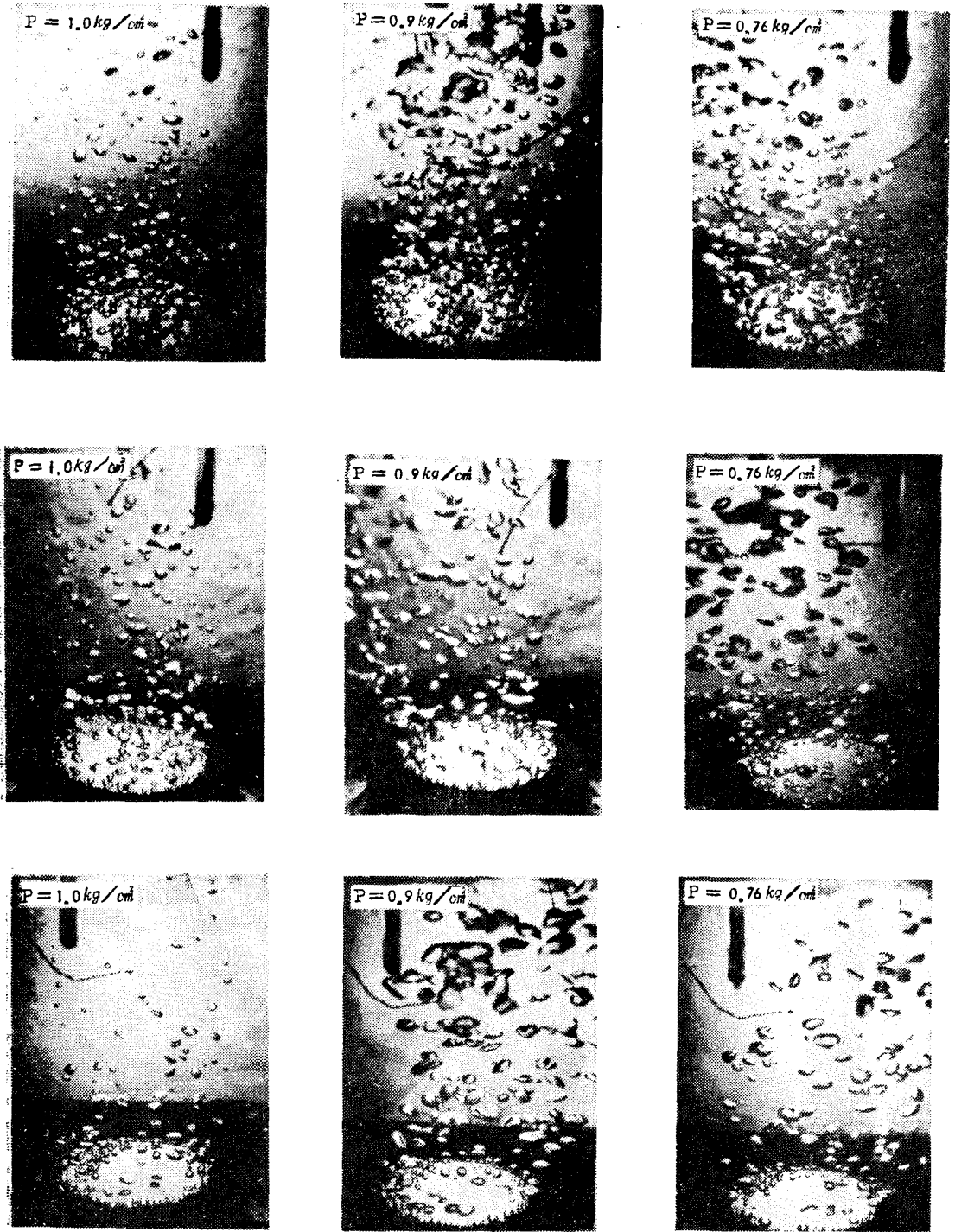


Photo. 2. Boiling in distilled Water

서 急上昇하는 것이 보이며, 따라서 減壓에 따라 기포직경이 증대하는 사실과 기포의 발생과 정지가 不規則하게 되는것을 관찰할수 있다.

또 Fig. 8은 壓力에 따른 氣泡의 上昇速度의 變化를 나타내는 것으로 이로부터 壓力이 강하함에 따라 기포의 上昇速度가 增加하는 것을 알 수 있다. 이는 위의 photo(2)로부터 觀察된 사실과 일치하는 것으로 사료된다.

그리고 Fig. 9에는 열유속에 대한 기포의 상승속도의 變化가 표시되었다.

열유속이 증가함에 따라 기포의 상승속도도 빨라지나 그 변화량은 아주 적은 것이 대기압 狀態에서 보여주고 있는데 반하여 壓力이 낮아질 때는 특히 낮은 열유속에서 기포의 상승속도의 變化量은 큰 값을 갖는다.

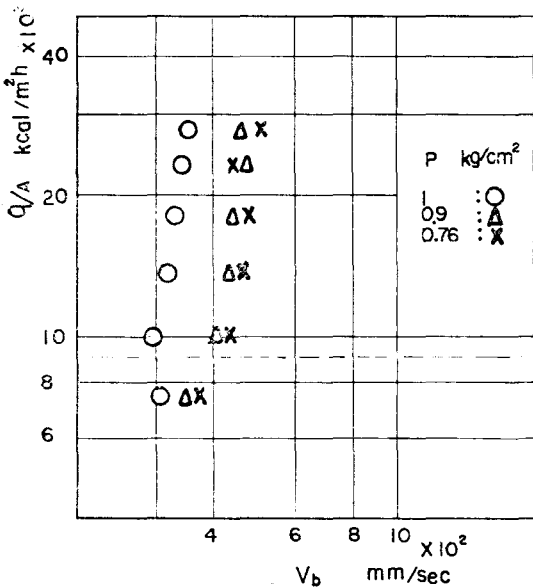


Fig. 9. heat flux versus bubble rising velocity.

壓力에 따른 열전달계수의 變化關係를 구하기 위하여 종축에 α/α_0 , 즉 대기압에서의 열전달계수 α_0 에 대한 實驗壓力下에서의 열전달계수 α 의 비를, 그리고 횡축에 壓力 p 를 잡아 Fig. 10에 표시하였다.

NISHIKAWA의 결과가 壓力 p 의 0.4승에 比例하여 열전달계수 α 가 증가하는데 本 實驗에서는 열전달계수 α 가 壓力 p 의 0.18승에 比例

하여 증가하는 것이 나타났다.

NISHIKAWA의 實驗 Data(4)와의 比較를 위하여 Fig. 11에 壓力에 따르는 熱傳面을 이탈한 후의 기포직경을 표시하였다.

壓力이 감소함에 따라 기포의 직경이 증가하는 比率은 NISHIKAWA의 결과와 일치하나 그 절대값은 약간 큰 것을 보여 주고 있다. 이는 NISHIKAWA의 결과에서는 열유속이 명기되어 있지 않으며, 그러나 이것은 本 實驗에서 보여준 열유 속에 비하여 낮은 값을 취한 것으로 생각된다.

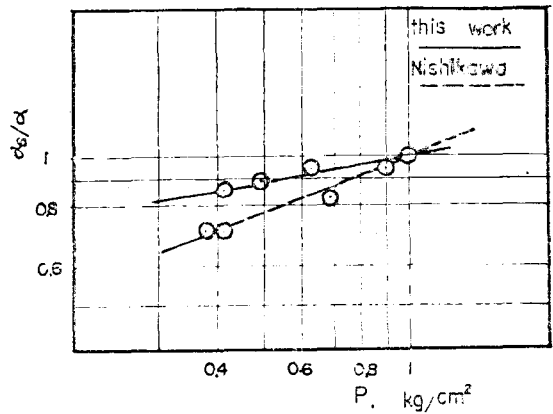


Fig. 10. heat transfer coefficient as influenced by pressure

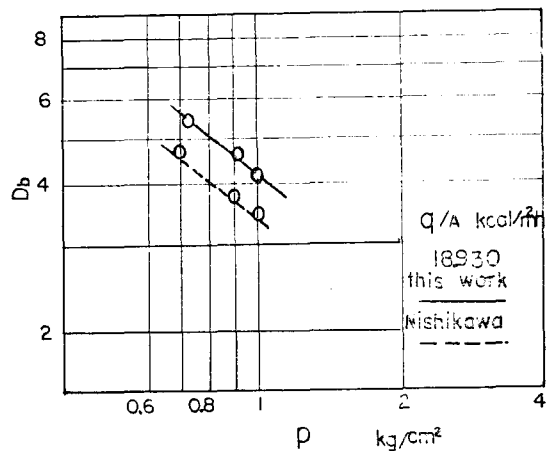


Fig. 11. the bubble dianter vs. pressure with nishikawa's data

4. 結 論

大氣壓(1.0332ata)에서부터 0.42ata까지의 감압된 압력하에서 핵비등에 대한 實驗을 Nickel 도금된 수평전열면을 사용하여 증류수에 대해서 실시한 결과 감압하에서의 기포발생기구에 관해서 다음과 같은 것들이 규명되었다.

1) 열전달계수 α 가 압력 p 에 따라 다음 식과 같은 표시식으로 나타난다.

$$\alpha/\alpha_s = cp^{0.18}$$

2) 기포의 상승속도는 압력이 강하함에 따라 증가한다.

3) 기포발생점수는 열유속이 증가함에 따라 증가하며 또한 압력이 낮아짐에 따라 감소한다.

그러나 낮은 압력과 높은 열유속에서는 그 변화가 일정하게 나타난다.

후 기

본 연구는 인하대학교 부설 산업과학 기술연구소의 연구비 보조(1965년)에 의해 이루어졌으며 학교 당국의 연구비 지급에 대해 감사드리며, 또한 본 논문 작성에 많은 조언을 하여 주신 서정윤 박사에게 심심한 사의를 표하는 바이다.

REFERENCES

1. Griffith, P. and Han, C.Y. "The Mechanics of heat transfer in nucleated pool boiling", M.I.T. Mech. Eng. Dept. Report TIL. p.113219
2. Jakob, M. "Heat Transfer", Vol.1, Wiley. New York(1941)
3. Han, C.Y. and Griffith, p. "The Mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling. Part II." Int. J., Heat Mass Transfer, 8, 905 (1965)
4. N. Nishikawa and K. Urakawa "An Experiment of Nucleate Boiling under reduced pressure" J.S.M.E. Vol, 23, No.136 pp.935-937 (1957)
5. C.J. Rallis and H.H. Jawurek "Latent heat Transport in Saturated Nucleate Boiling" Int. J., Heat Mass Transfer. Vol.7, pp.1051-1068 (1964)
6. R. Cole. "Bubble Frequencies and Departure Volumes at Subatmospheric Pressure" A.I.Ch. E.J., 13-4, p.779(1967)
7. W.H. McAdams. "Heat Transmission" 3rd Edition, McGraw Hill Book Co. New York, pp.380-384 (1954)
8. 日本機械學會 "傳熱工學資料"(改訂第2版) p.54, (1966)