

細孔을 갖는 傳熱面에서의 核沸騰 熱傳達到 關한 研究

"A study of Nucleate Boiling Heat Transfer from Artificial Nucleation Sites"

任 將 淳*
Chang Soon Yim

< Abstract >

Pool Boiling heat transfer from controlled arrays of artificial nucleation sites was studied experimentally. Distilled water were boiled from artificial sites of uniform size, shape and spacing, drilled in superfinished copper horizontal surfaces at site density of 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100 per 2.25 cm^2

The results confirm the boiling heat transfer from artificial sites can be improved by increasing the site density N/A or temperature difference ΔT or both.

Following experimental correlation were developed for predicting the heat transfer rate from the heating surface which has artificial sites.

$$q/A = C(T_s - T_{sat})^{1.811} (N/A)^{0.41}$$

記号說明

序 論

- A ; Area of heating surface [cm^2]
- a ; Exponent in equation 1
- b ; Exponent in equation 1
- c ; Constant in equation 1 and 2
- N ; Number of artificial nucleation sites
- q/A ; Heat flux [W/m^2]
- T ; Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
- T_s ; Temperature of heating surface [$^{\circ}\text{C}$]
- T_{sat} ; Saturation temperature of bulk liquid [$^{\circ}\text{C}$]
- ΔT ; Temperature difference ($T_s - T_{sat}$) [$^{\circ}\text{C}$]

核沸騰에 關한 初期의 研究가 Jakob and Linke[1], Jakob and Fritz[2]에 의해 發表된 이래 많은 體系的인 研究結果가 報告되고 있다. 그러나 核沸騰熱傳達機構는 매우 複雜하여 아직도 이에 대한 完全한 解析은 이루어지지 않고 있는 實情이다.

이에 대한 理由로는 여러가지가 있겠으나 그 중 重要的 것중의 하나는 傳熱面의 氣泡發生點에서 發生하는 氣泡에 의한 二相流系의 流體動力學的인 特性과 沸騰동안에 일어나는 各種 熱傳達過程이 各各 相互關聯을 갖고 있다는 事實이다.

더우기 임의로 沸騰傳熱面의 氣泡發生 核點을 調節하는 것이 어렵기 때문에 沸騰機構를 解析하는 데는 많은 어려움이 뒤따른다.

* 正會員, 漢陽大 工大

傳熱面의 核發生能力은 주어진 溫度差 및 熱流束에서 傳熱面에서의 氣泡發生點密度를 決定해 주며 따라서 이는 傳熱面附近에서 일어나는 沸騰液의 流體動力學的인 特性에 큰 영향을 준다.

지금까지 發表되고 있는 大部分의 氣泡發生點密度와 關聯된 研究에서는 商品傳熱面을 使用하여 熱傳達機構를 考察한 것들로 이와같은 傳熱面에서는 氣泡發生點密度的 氣泡發生週期를 完全히 調節할 수 없는 缺點을 갖고 있다.

核沸騰熱傳達機構의 解析을 容易하게 하기 위하여는 傳熱面의 氣泡發生能力을 制御함으로써 氣泡發生으로 인한 流體動力學的인 特性을 熱的인 特性과 獨立시켜 研究할 必要가 있다.

이와같은 目的을 達成하기 위한 研究로는 Griffith and Wallis[3]에 의해 最初로 發表된 論文이 있으며 그들은 傳熱面上에 人工的으로 氣泡發生核點을 만들어 주어 氣泡發生能力을 調節함으로써 氣泡發生에 따른 傳熱面附近의 流體流動特性을 분리하여 解析한 結果, 물에 대한 沸騰曲線으로부터 人工的으로 구멍을 뚫은 면이 매끈한 면에 비해 주어진 熱流束에서 낮은 過熱度를 必要로 하는 것을 확인하였다. 또한 Miyauchi & Yagi[4]는 水平傳熱面의 圓筒形 cavity로 부터 여러가지 液體에 대한 核沸騰實驗을 行하였다. 人工核點으로는 계획된 幾何學的인 配列 및 構造로 1개/cm²부터 64개/cm²까지의 密度로 구멍을 뚫어 만들었다.

實驗結果를 表示한 沸騰曲線에서 一定한 核點密度를 가질경우 두개의 分明한 熱傳達區域, 즉 自然對流의 영향을 받는 自然對流沸騰區域과 強制對流의 영향을 받는 強制對流沸騰區域이 存在한다는 것이 나타났다. 또한 그들의 data에 의하면 人工核點密度는 熱傳達係數에 제한된 영향만을 미치고 있는 것으로 나타났다. 즉 거의 大部分의 實驗結果들로부터 核點密度가 增加함에 따라 熱傳達係數의 한정된 增加만이 보고되었을 뿐이다.

Young & Hummel[5]은 teflon으로 塗裝된 金屬板위에 不規則하게 人工核點을 만들어 實驗한 結果 매끈한 傳熱面의 沸騰에 比하여 向上된

熱傳達係數를 얻었다.

한개의 人工核點으로 부터의 沸騰實驗에 대한 熱傳達 data[4]와 함께 數個의 人工核點으로 부터 沸騰熱傳達에 關한 報告書[6]가 發表되었으나 아직도 核點密度가 沸騰熱傳達에 미치는 영향은 完全히 究明되고 있지 않은 實情이다.

따라서 本 研究의 目的은 等間隔으로 만들어진 人工核點들로부터의 核沸騰에 있어 熱傳達過程을 支配하는 重要因子들에 關하여 研究하는 것이며 특히 活動性 核點密度와 氣泡發生率이 核沸騰熱傳達에 미치는 영향을 考察하는 것이다.

實 驗

實驗裝置

푸울核沸騰 實驗裝置에 대한 概略圖는 그림 1과 같으며 그림 2는 沸騰容器에 관한 概略圖이다. 沸騰容器는 鋼板(1.6^t)을 材料로 하여 가로×세로×높이가 150 mm×150 mm×150 mm가 되도록 製作하였으며 容器内部는 산화를 防止하기 위하여 耐熱放水塗料(흑색)로 塗裝하였다. 容器의 양쪽에는 傳熱面에서 發生하는 氣泡의 舉動을 觀察하고 또한 촬영이 가능 하도록 직경 7 cm의 유리창을 設置하였다.

容器内部에는 補助加熱器(400watt 1個)를 設置하여 沸騰液體를 豫熱시켰으며 自動溫度調節器의 作動으로 언제나 一定한 溫度를 유지하도록 하였다.

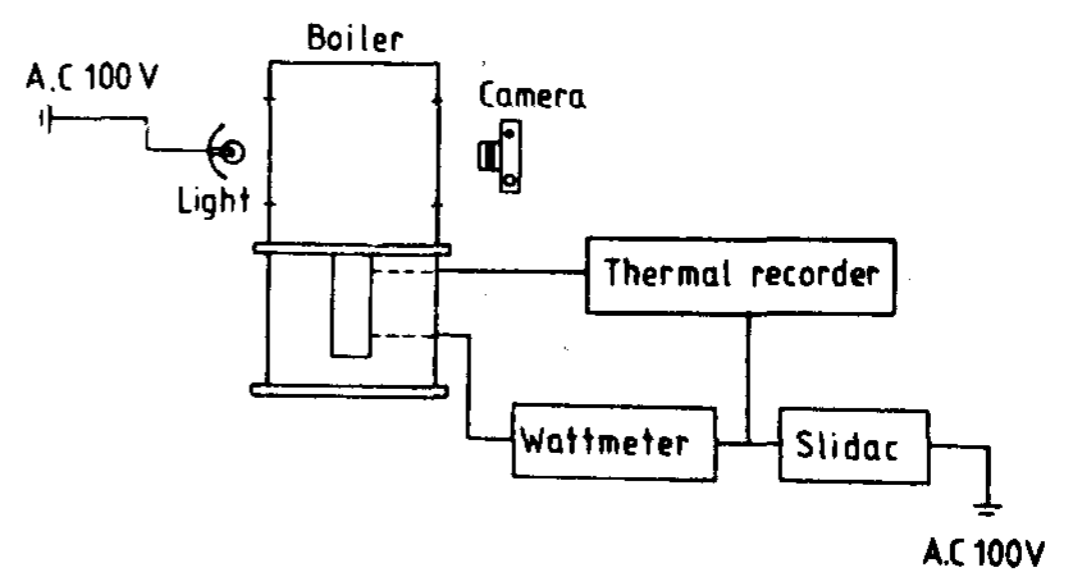


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

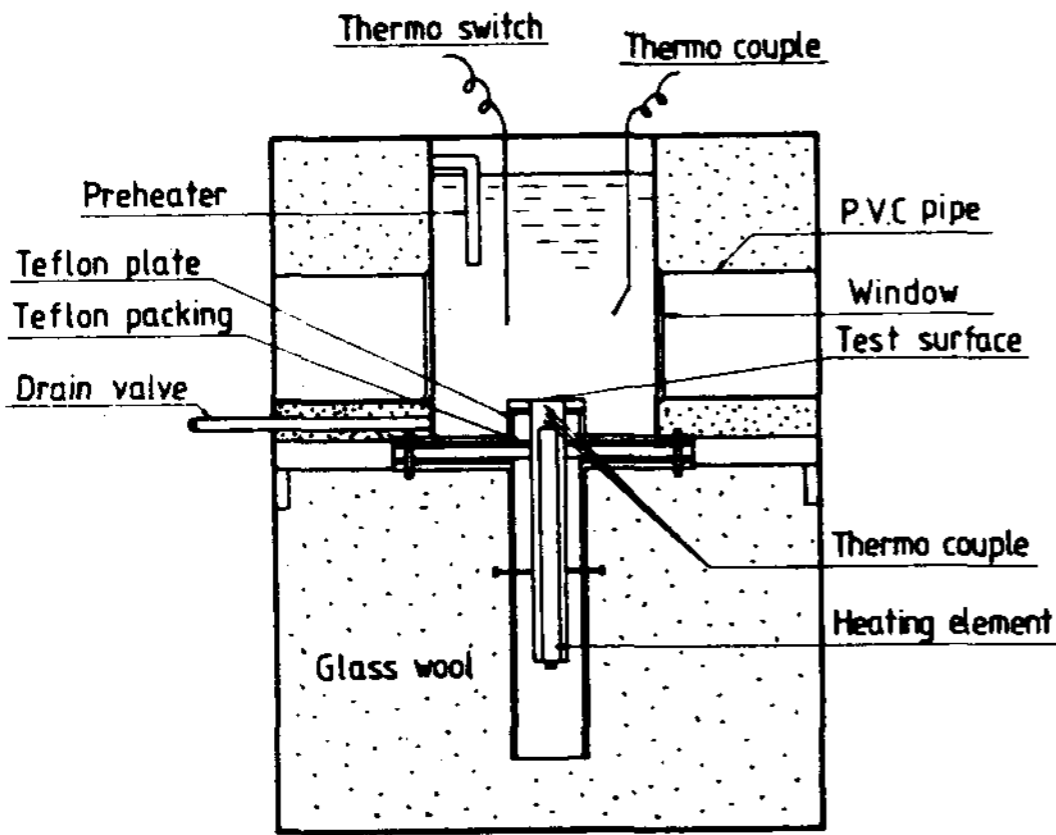


Fig. 2 Schematic showing of experimental heater & boiler

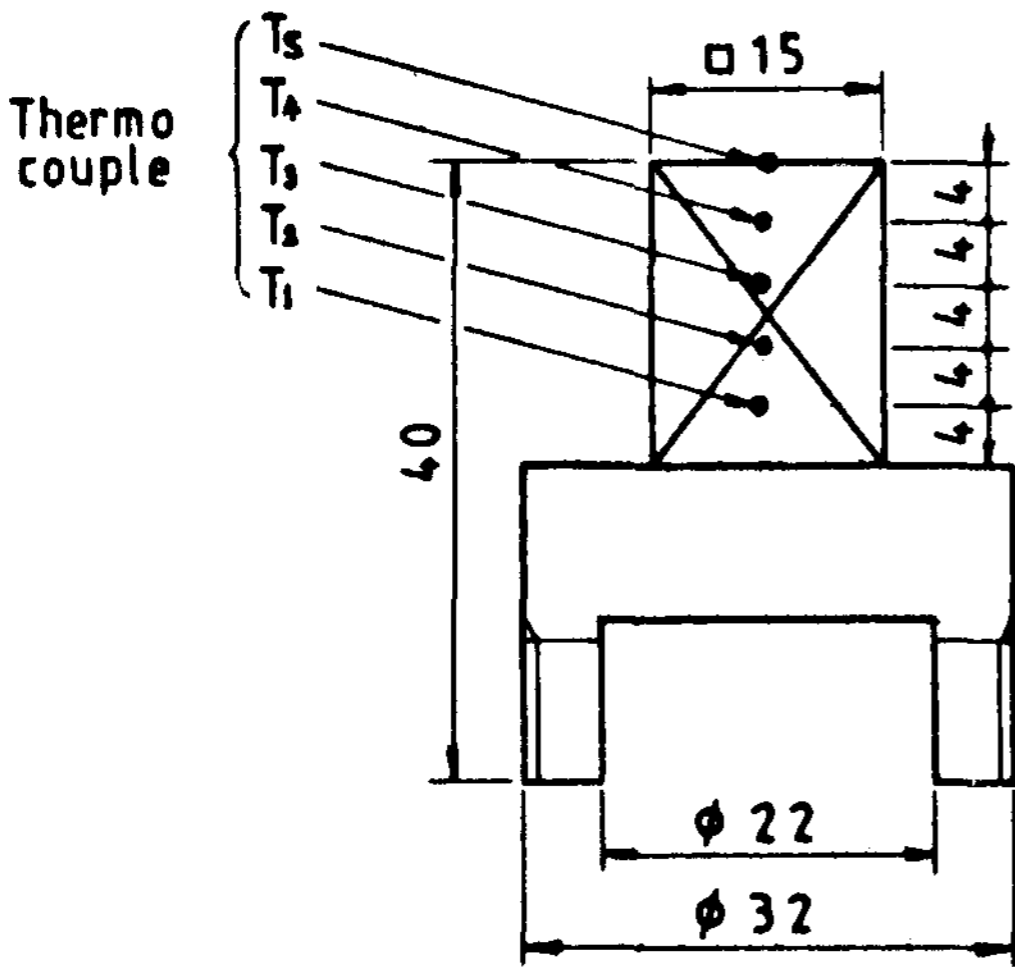


Fig. 3 Heating element

加熱裝置는 그림 2에 나타낸 바와같이 直徑 32 mm의 銅棒에 直徑 22 mm, 높이 10 mm의 구멍을 파고 그 속에 圓筒形 加熱器 (500 watt 1個)를 插入하였으며 圓筒形 加熱器 上端에 그림 3과 같은 試片을 附着시켜 加熱器로부터 試片으로 熱이 傳達되도록 하였다. 그리고 半徑方向으로의 熱損失을 막고 軸方向으로 熱이동을 유도하기 위하여 加熱器주위는 全部 유리섬유와 석면으로 외부와 斷熱시켰으며 試片 주위로 부터의 放熱은 teflon을 사용하여 斷熱시켰다.

傳熱面

本實驗에 사용한 傳熱面은 가로×세로×높이가 (15 mm×15 mm×20 mm)의 銅棒으로 加工하였으며 表面을 emery paper (No. 1000)로 研磨 한다음 Cr₂O₃로 表面을 鏡面加工하였다. 人工核點의 加工은 Heled等 [7]이 제시한 方法에 의해 millimetric graph를 확대시켜 한번이 15 mm인 정사각형 試片위에 4², 5², 6², 7², 8², 9², 10²個의 좌표점을 만든후 직경 0.5 φ drill을 사용하여 고속 drilling machine으로 傳熱面 表面에 0.2~0.3 mm의 깊이로 뚫어 만들었다.

實驗方法

實驗은 大氣壓下에서 증류수를 使用하였으며 증류수 내에 녹아있는 空氣를 제거하기 위하여 充分히 끓여서 냉각시킨 다음 容器에 넣고 傳熱面을 加熱시킨후 傳熱面의 溫度가 40°C가 되면 補助加熱器를 작동시켜 飽和溫度에 到達하게 하였다.

豫備實驗을 통해 試片의 溫度분포가 加熱開始 후 약 4시간 부터는 거의 定常狀態에 到達하는 것이 確認되었으며 따라서 本實驗에서는 溫度分布가 定常狀態에 到達하도록 하기 위하여 最初에는 4時間을 加熱시킨후에 測定을 始作하였고 熱流束을 增加시킬때에는 약 40분이 지난후 부터 1분간격으로 溫度를 測定하였다. 이때 溫度測定에 使用한 機器는 DATA LOGGER 로써 model은 Fluke 2200B(U.S.A)이다.

매회 實驗을 行할때마다 傳熱面은 아세톤과 증류수로 세척 건조시켜 傳熱面上의 불순물이 주는 영향을 없애도록 하였다.

熱流束은 그림 3에서와 같이 試片 上端으로부터 4 mm [T₄], 8 mm [T₃], 12 mm [T₂], 16 mm [T₁]되는 곳에 試片의 中心까지 지름 1 mm의 drill로 깊이가 25 mm가 되게 中心軸까지 뚫었으며 여기에 C-C熱電對 (φ 0.25 mm)를 插入하여 이로부터 測定된 溫度差를 使用하여 熱流束을 計算하였다. 그리고 沸騰液體의 溫度는 傳熱面上部 20 mm위에 C-C熱電對 (φ 0.25 mm)를 設置하여 測定하였다.

實驗結果 및 考察

一般傳熱面을 사용한 從來의 沸騰實驗으로 부터는 熱傳達에 直接的으로 영향을 미치는 傳熱面의 氣泡發生能力에 대한 定量的인 解析이 거의 行해질 수 없었다.

傳熱表面의 氣泡發生點密度 N/A 는 制御 및 測定하기가 결코 쉽지 않기 때문에 從來의 研究에서는 氣泡發生點密度 N/A 대신 表面을 加工한 研磨紙의 等級이나 傳熱表面의 r.m.s. 表面粗度를 使用하여 沸騰熱傳達에 대한 影響을 觀察하여 왔다.

그러나 이러한 方法은 氣泡發生點密度를 制御하는 適切한 方法이 되지 못하는 경우가 많기 때문에 最近에는 매끈한 傳熱面에 均一한 크기, 形態 및 間격으로 人工的인 氣泡發生點을 만들어 주어 沸騰熱傳達에 미치는 影響에 관한 定量的인 解析이 試圖되고 있다. [3]

이들은 人工氣泡發生點에서만 氣泡가 發生하고 人工氣泡發生點을 除外한 다른 部分은 非活性이라고 가정하여 核沸騰區域에서 人工氣泡發生點密度 N/A 의 變化가 沸騰曲線에 顯저한 影

響을 준다고 報告하였다.

本 研究에서 使用된 傳熱面은 純銅으로 된 棒을 加工하여 그 表面에 等間隔으로 人工的인 核點을 만들어 준 것으로서 傳熱面의 表面溫度의 測定은 Monde and Kato [8] 등이 使用한 方法에 따라 그림 3에서 測定된 各點의 溫度로부터 그림 4와 같이 求하였다.

各 傳熱面에 대한 沸騰熱傳達資料가 그림 5와 6에 沸騰曲線으로 表示되었다. 그림 5에서는 一定人工核點密度마다 過熱溫度差 ΔT 에 대한 沸騰熱流束이 그려졌다.

여기서 過熱溫度差의 增加에 따른 熱流束의 增加率은 人工核點을 갖는 傳熱面의 경우가 매끈한 傳熱面보다 낮은 값을 갖는다.

또한 同一한 過熱溫度差에 대하여는 熱流束값은 一般的으로 人工核點密度가 커짐에 따라 順次的으로 큰 값을 갖는 것이 보여진다.

核沸騰에서 熱傳達에 영향을 미치는 가장 重要한 因子는 傳熱面 附近에서의 氣泡의 離脫로 야기되는 液體의 流動現象인데 이는 液體의 流動效果가 熱傳達 係數에 直接的인 影響을 주기 때문이다.

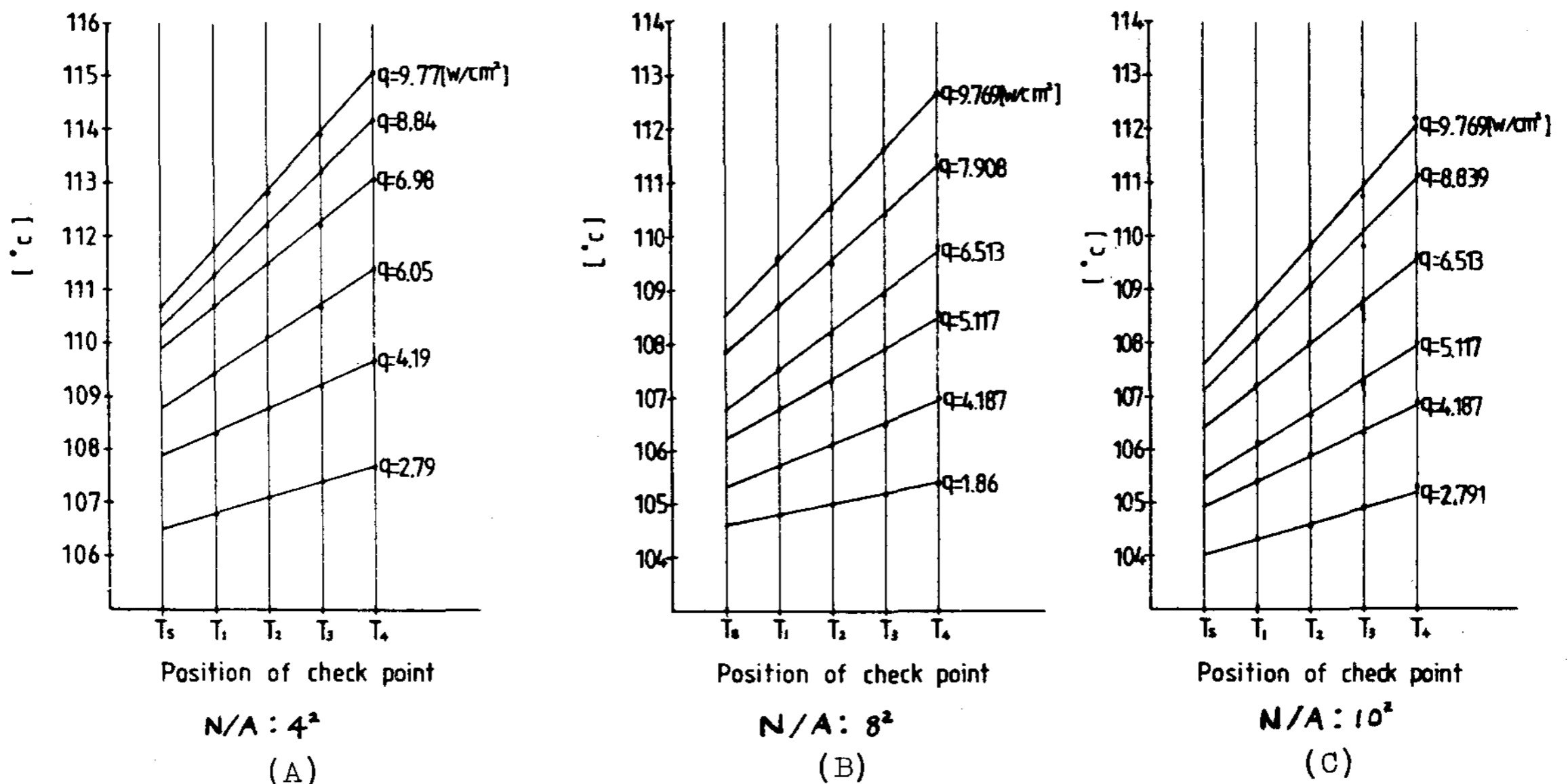


Fig. 4 Surface temperature calibration

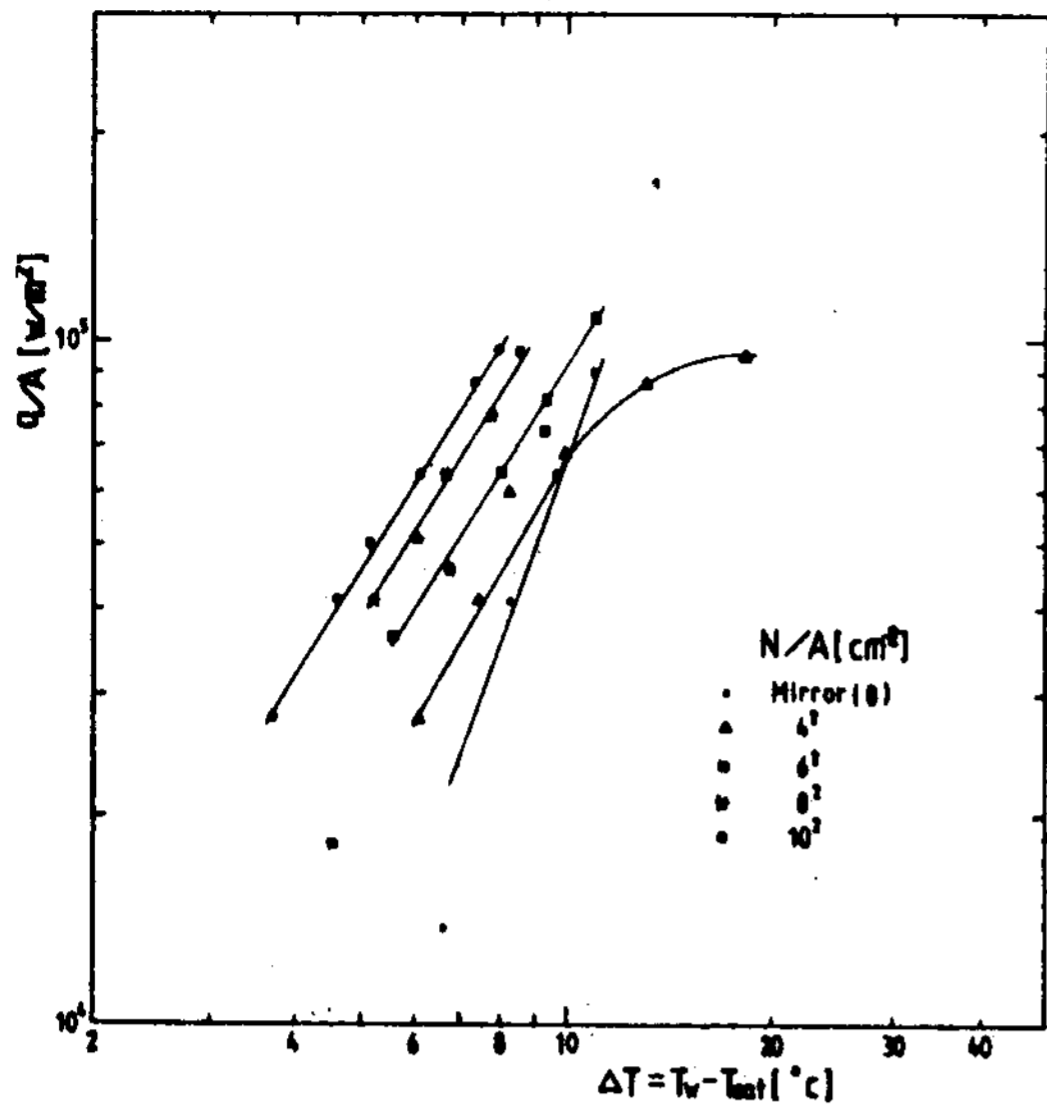


Fig. 5 Boiling curve

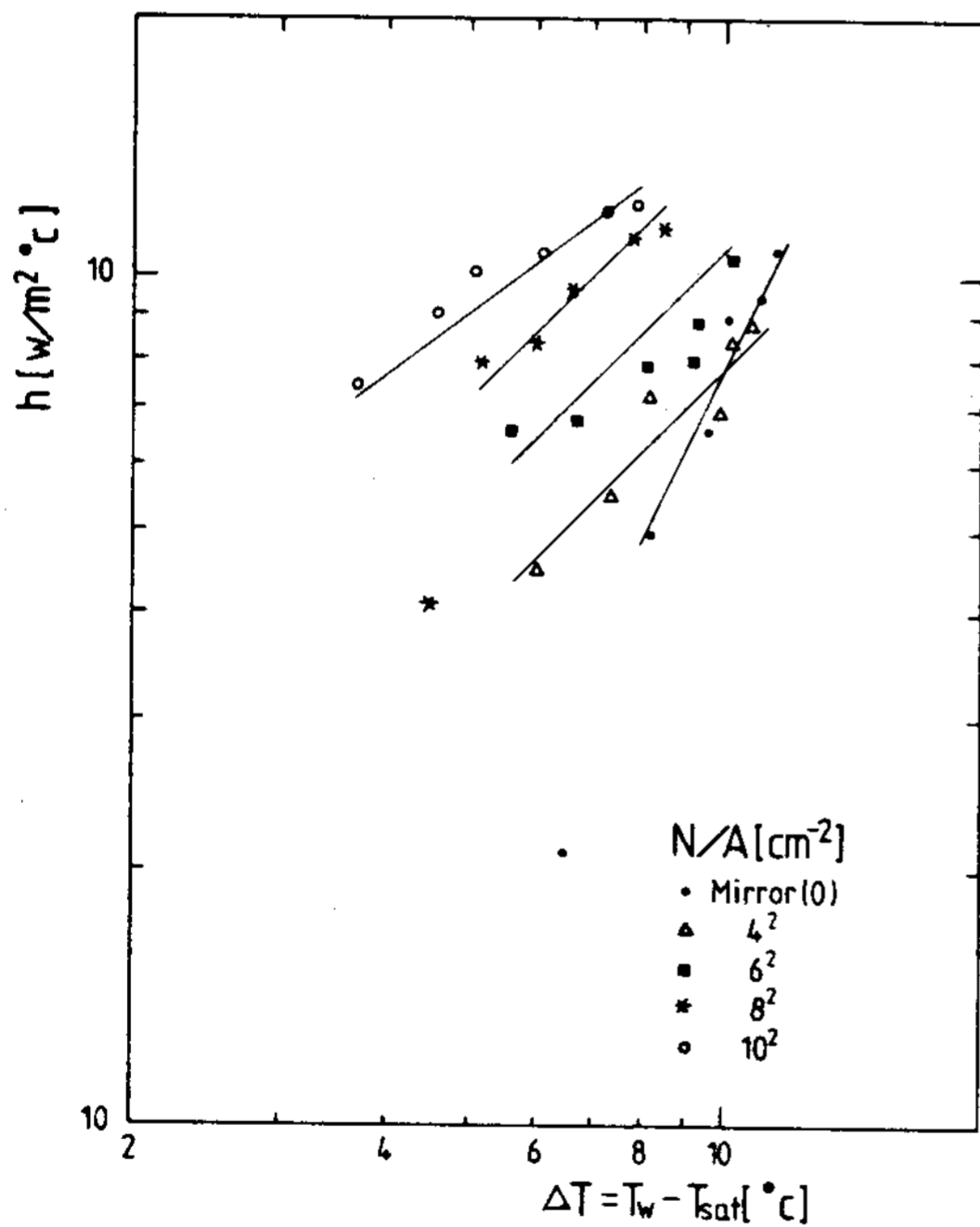


Fig. 6 Temperature difference (ΔT) versus heat transfer coefficient (h).

過熱溫度差 ΔT 에 대한 熱傳達 係數 h 를 各 各의 核點密度에 대해 그린 그림 6에서는 매끈한 傳熱面에서의 過熱溫度差의 增加에 따른 熱傳達 係數의 增加率은 人工核點을 갖는 傳熱面

에 비해 크지만 人工核點을 갖는 傳熱面에서의 熱傳達 係數의 값은 매끈한 面에서의 값보다 크다. 또한 人工核點密度가 增加함에 따라 同一한 過熱溫度差에서의 熱傳達 係數는 큰 값을 나타낸다.

그림 5와 6에서 人工氣泡發生點을 갖는 傳熱面은 매끈한 傳熱面에서 보다 沸騰熱傳達率이 向上되는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 過熱溫度差 ΔT 가 8.3°C 일 때 沸騰熱傳達 係數는 氣泡發生點密度 N/A 를 $16\text{個}/2.25\text{cm}^2$ 에서 $100\text{個}/2.25\text{cm}^2$ 로 增加시킴에 따라 136% 增加함을 觀察할 수 있었는데 이는 N/A 가 增加함에 따라 發生하는 氣泡의 數가 增加되어 傳熱面 근처에 있는 液體의 流動效果에 의해 傳熱面 부근에 形成된 얇은 熱境界층을 통한 熱傳達 係數가 增加되는 것으로 評價된다.

이와같은 傾向은 各核點密度에 대하여 過熱溫度差에 따른 熱傳達 係數를 包含하는 無次元數 Nu 數의 變化를 나타낸 그림 7로부터 더욱 명확해 진다. 여기서 傳熱面의 特性길이 X 는 0.015m 이다.

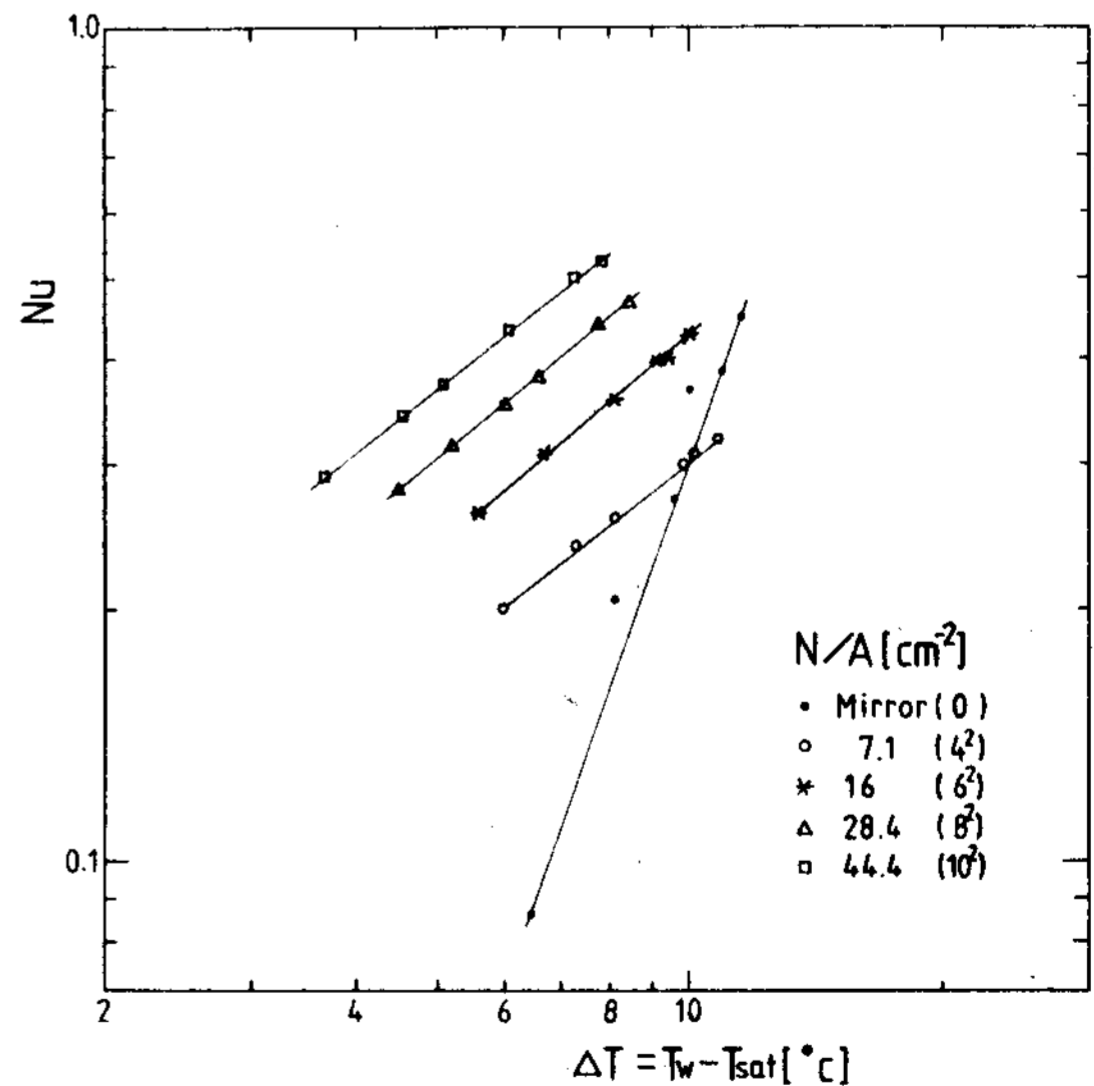


Fig. 7 Effects of nucleation site density on boiling heat transfer

그러나 人工氣泡發生點이 있는 傳熱面을 使用하여 熱傳達 係數를 無限히 向上시킬 수는 없다 [7], 왜냐하면 人工氣泡發生點들의 간격이 氣泡의 이탈직경과 비슷하게 될 정도로 조밀하게 되면 인접한 氣泡들은 傳熱面上에서 合體現象을 빚어 傳熱面은 점차 蒸氣氣泡로 덮히게 되며, 熱傳達 係數는 減少하는 結果를 가져온다. 이러한 現象으로 因하여 最大熱傳達 係數가 存在한다는 것이 Seo [9] 및 Yim [10]에 의해 報告되었다.

氣泡發生點密度 N/A 와 過熱溫度差 ΔT 가 沸騰熱傳達에 미치는 影響을 定量的으로 表示하기 위하여 Hatton and Hall [11], Nishikawa [12] 등이 제시한 式

$$q/A = C (T_s - T_{sat})^a (N/A)^b \dots\dots (1)$$

에서 常數 C 및 指數 a, b 를 本 實驗資料로부터 求한 結果 다음과 같은 式으로 나타냈다.

주

$$q/A = C (T_s - T_{sat})^{1.811} (N/A)^{0.41} \dots (2)$$

여기서 常數 C 의 값은 本 實驗범위내에서 12로 算定되었다.

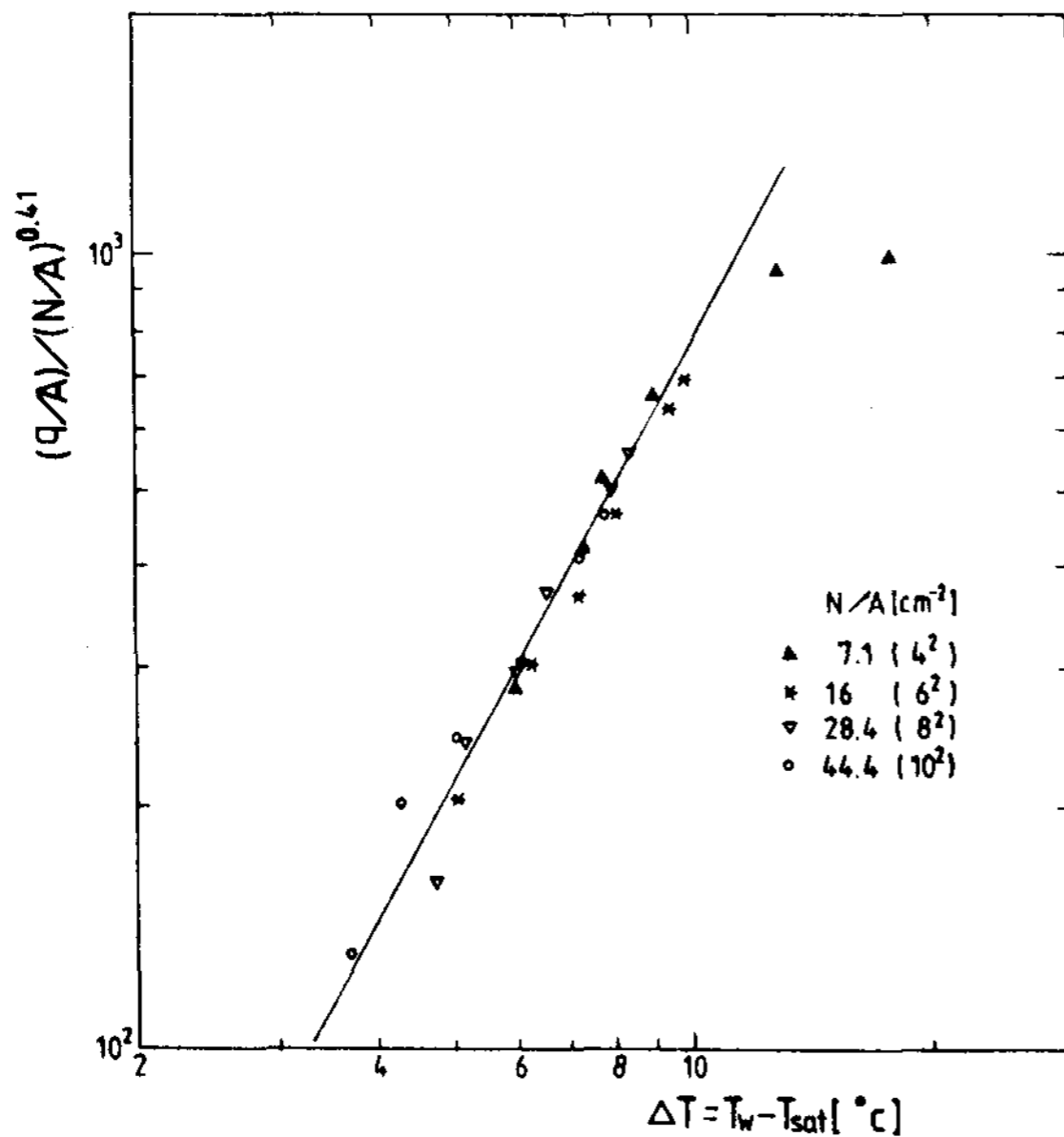


Fig. 8 Correlation of boiling heat transfer

傳熱面의 매끄러운 表面에서 發生하는 氣泡가 熱傳達에 미치는 影響을 무시하고 人工적으로 만든 氣泡發生點에서만 氣泡가 發生한다고 가정하여 구한 實驗式 (2)를 實驗을 통하여 測定된 값과 比較하기 위하여 그림 8에 過熱溫度差 ΔT 에 대한 $(q/A)/(N/A)^{0.41}$ 의 값을 各 核點密度에 대해 그렸다.

여기서 式(2)와 實驗값은 $\pm 20\%$ 의 誤差가 있었을 뿐이며 이러한 사실로 부터 氣泡發生點密度 N/A 를 調節하여 N/A 와 過熱溫度差 ΔT 가 沸騰熱傳達에 미치는 影響을 나타낸 一般式 (2)는 比較적 妥當性이 있는 것으로 판단된다.

또한 各 研究者들이 구한 指數 a, b 값과 本 研究를 통해 얻은 값들을 다음의 表에서 比較하였으며 그 結果 本 實驗을 통해 決定된 指數 a, b 의 값들은 다른 研究者들의 그것들과 近似하다는 것이 밝혀졌다.

Table, The values of exponent a and b

Author	a	b
Nishikawa [12]	1.5	0.25
Tien [13]	1	0.5
Zuber [14]	1.67	0.333
Zuber [15]	2	0.25
Heled [7]	1.83	0.42
This Work	1.811	0.41

結 論

本 研究에서는 大氣壓下에서 人工적으로 만든 核點密度가 $4^2 \sim 10^2$ 個/ $2,25 \text{ cm}^2$ 에 대해 蒸溜水를 使用하여 沸騰實驗을 행한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 傳熱面의 人工氣泡發生點密度 N/A 은 po^{-01} 核沸騰熱傳達에 重要한 影響을 미치고 있다.
- 2) 人工氣泡發生點 이외의 매끈한 傳熱面에서 發生하는 氣泡들이 熱傳達에 미치는 影響을 무시하고 人工氣泡發生點에서만 氣泡가 發生하는 것으로 가정하여 구한 實驗式은 이와같은 가정이 비교

적 妥當성이 있음을 立證하였다.

3) 本 實驗범위내에서는 一定한 過熱溫度差에서 人工氣泡發生點密度가 增加함에 따라 沸騰熱 傳達係數의 값은 뚜렷이 向上되었다.

4) 傳熱面의 氣泡發生點密度 N/A 와 過熱溫度差 ΔT 가 熱傳達에 미치는 영향은 式(2)와 같이 定量的으로 표시된다.

後 記

本 研究는 漢陽大學校의 1980년도 2기研究費에 의해 수행되었으며 학교 당국에 사의를 표한다. 또한 論文作成 및 資料整理에 도움을 준 한국에너지 研究所의 박재홍씨 및 大學院生 조현걸, 박상규, 정원락씨에게도 감사를 드린다.

< 참고 문헌 >

1. Jakob and Linke, "Heat transfer from a horizontal plate." Forsh. Gebiete Ingenieurw, V.4(2), pp. 75-81(1933)
2. Jakob and Fritz, "Versuche Uber den Verdampfungsvorgang." Forsh. 2 Bd. Heft 12, p. 435 (1931)
3. Griffith, p. and Wallis, J. D., "The role of surface conditions in nucleate boiling." Chem. Eng. Progr. Symp. Ser. 56, p. 49 (1960)
4. Miyauchi, T. and Yagi, S., "Nucleate boiling heat transfer on horizontal flat surfaces." Kagaku Kogaku 25, p. 18 (1961)
5. Young, R. K. and Hummel, R. L., "Improved nucleate boiling heat transfer. Chem. Engng. Progr. 60, P. 53 (1964)
6. Marto, P. J., Moulson, J. A. and Maynard, M. D., "Nucleate pool boiling of nitrogen with different surface conditions." J. Heat Transfer, A. S. M. E. 90, P. 437 (1968)
7. Heled, Y., Rickils, J. and Orell, A., "Pool boiling from large arrays of artificial nucleation sites." Int. J. Heat Mass Transfer, 13, P 503(1970)
8. Monde and Kato, "A study of burnout heat flux in impinging flow." 12th. Int. Heat Trans. Conf. in Japan (1975)
9. Seo, J. Y., "Nucleate boiling heat transfer from sintered porous metal surface." Ph. D. Thesis, Inha University, (1975)
10. Yim, C. S., "The behavior of bubbles on porous sintered metal surface during pool boiling." Ph. D. Thesis, Inha University, (1978)
11. Hatton, A. P. and Hall, I. S., "The influence of surface roughness and a wetting additive on pool boiling on horizontal rods." Proc. Insten. Mech. Engrs. 180, p. 160(1965-66)
12. Nishikawa, K., Trans. J. S. M. E. 26, P. 726 (1960)
13. Tien, C. L., "A hydrodynamic model for nucleate pool boiling." Int. J. Heat Mass Transfer, 5, pp. 533-540 (1962)
14. Zuber, N., "Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection." Int. J. Heat Mass Transfer, 6, pp. 53-78 (1963)
15. Zuber, N., "Hydrodynamic aspects of nucleate pool boiling, part 1 the region of isolated bubbles." Rep. RW-RL-164(1960), AEC Rep. T. I. D. 6338