

核沸騰熱傳達에 미치는 傳熱面表面條件의 影響

車 指 永* · 任 將 淳** · 徐 正 潤***

“The Effect of Heating Surface Conditions on the Nucleate Boiling Heat Transfer”

J. Y. Cha, C. S. Yim, J. Y. Seo.

Abstract

The importance of surface conditions of nucleate boiling is well recognized and it has been known that the heat transfer to boiling liquid is closely related to the bubble population density.

The bubble population density should depend on various factors such as heat flux, surface roughness, surface contamination, properties of liquid, etc. In this paper the effect of surface conditions on heat transfer in nucleate boiling is treated.

The experiments were carried out with distilled water boiler, on the horizontal heating surfaces, sintered with various bronze particle, under atmospheric pressure.

In addition, experimental investigation for the polished bronze surface was performed. By studying a coefficient X_b defined by eq. (9), which represents the bubble foaming ability of heating surface, generalized formula on the heat transfer in the nucleate boiling were expressed.

The coefficient X_b , determined empirically, is not constant and indicates a major influence of the sintered metal surfaces on the ΔT , necessary to sustain nucleate boiling at any given heat flux.

In this study, the main results are obtained as follows;

- (1) At low temperature difference, the coefficient X_b of sintered metal surface was found to be higher than the polished surface throughout the full range of experiments.
- (2) The optimum sintered structure showing the maximum coefficient X_b has been confirmed to exist and it is encountered when particle diameter is 256μ .

1. 序 論

核沸騰熱傳達의 影響因子中에서 傳熱面의 表面條件은 가장 重要한 것중의 하나다.^{1,2)}

따라서 傳熱面의 表面條件에 關係되는 因子가 무수히 있다는 것이 認識되고 있고 同時에 어떤 特定因子만을 가지고 核沸騰現象을 明確히 表明하여 傳熱特性에 미치는 因子의 影響을 定量的으로 把握한다는 것은 매우 어려운 일이다.³⁾

一般的으로 核沸騰熱傳達에 關해서 從來發表된 整理式을 大別하면 表面條件을 고려하는 因子를 포함하지 않는 것과 이것을 포함하는 것의 두가지로 나눌수있다.

* 仁荷大學校 附設 工業專門學校 機械科
 ** 正會員 慶熙大學校 機械工學科
 *** 正會員 仁荷大學校 機械工學科

그러나 핵沸騰 熱傳達は 傳熱面의 表面條件에 의해서 크게 좌우되며^{3, 4, 5} 특히 表面의 粗度가 第次的 影響을 미치게 된다는 것을 고려할때 傳熱面의 表面條件을 고려하지않는 整理式으로 하여금 모든 핵沸騰熱傳達을 포함시킨다는 것은 거의 不可能한 것으로 생각된다.

故로 本 實驗에서는 表面條件에 의한 影響을 調査하기 위하여 傳熱面의 表面을 人工的으로 만들었다. 즉 傳熱面表面은 球形粒자를 燒結하여 만든 金屬層으로 하였다. 따라서 本 研究에서는 이 傳熱面에서의 氣泡發生의 難易性 즉 傳熱面의 表面狀態에 의해서 변하는 特性因자를 包含한 係數를 求하고 또한 實驗結果에 따라 이 係數의 變化를 調査 研究하여 鏡面의 경우와 比較檢討코저한다.

2. 實 驗

2-1. 實驗裝置

Fig 1은 沸騰實驗裝置의 構成圖를 표시하며 Fig 2는 沸騰裝置의 本體를 나타낸다. 沸騰容器는 Stainless steel 板을 사용하며 30 cm×20 cm×25 cm 로 만들었으며 그 내용積은 1500 cm³이다. 容器의 양면에는 沸騰現象을 觀察할수 있도록 可視窓(유리)를 만들었다. 容器內部에는 補助 加熱器(250 Watt×2)를 設置하여 沸騰液體를 豫熱하는데 사용토록 하였으며 아울러 實驗中 一

定溫度를 유지하기 위하여 Thermo-Switch의 連動作用에 대해서 留意하였다. 沸騰容器의 內벽과의 벽사이에서 斷熱材를 充填하여 外部로의 熱損失을 最小로 되게 하였다.

本 實驗에 사용한 액체로는 蒸溜水를 사용하였으며 使用前에 한번 沸騰을 시켜서 물에 含有된 空氣를 除去시켰다.

또한 實驗中 水位는 底面으로 부터 一定하게 유지되도록 하기 위하여 發生蒸汽를 Condenser에 유도 응축시켜서 다시 循環하도록 하였다. 이때 水位는 20 cm 였다.

加熱體로는 黃銅을 사용하였으며 여기에는 板形 Heater(AC-100 Watt) 數個를 삽입하여 一次的으로 이 黃銅 Block을 加熱시켰다. 그中央에는 20 φmm×20mm 길이의 純銅棒이 삽입되어 있으며 이 上端에 固着된 傳熱面은 間接的으로 加熱되게 된다

2-2. 傳熱面

本 實驗에 사용된 傳熱面은 球狀青銅粒자를 燒結한 金屬面이며 Table 1과 같은 種類에 따라서 鏡面 傳熱面과 더불어 實驗을 實施하였다

2-3. 實驗方法

實驗은 먼저 加熱體(黃銅 Block)를 加熱시켜서 中心

Nomenclature

A = heating surface area, m²
 A_b = bubble surface area, m²
 A_{bi} = bubble surface area at heating surface when first formed, m
 a = thermal diffusivity of liquid, m²/hr
 C_t = specific heat of the fluid, Kcal/kg°C
 f = frequency of bubble formation, 1/hr
 J = mechanical equivalent of heat, 427kg-m/Kcal
 L = latent heat of evaporation, Kcal/kg
 n = number of points of origin of bubble columns per m² of heating surface
 Q = heat-transfer rate from heating surface, Kcal/hr
 Q_b = heat-carried away by bubbles, Kcal/hr
 Q_{ob} = heat-transfer rate from liquid to vapor bubble, Kcal/hr
 R = bubble radius, m

R_i = bubble radius at heating surface when first formed, m
 R_w = bubble radius at heating surface before leaving surface, m
 T = fluid temperature, deg C
 T_w = temperature of heating surface, deg C
 T_s = saturation temperature, deg C
 ΔT = temperature difference equal to $T_w - T_s$, deg C
 t = time variable, hr
 γ_l = specific gravity of liquid, kg/m³
 γ_v = specific gravity of vapor, kg/m³
 σ = surface tension, Kcal/m²
 X_b = coefficient defined by equation (9), nondimensional
 λ = thermal conductivity of saturated liquid, Kcal/hr. m. deg C

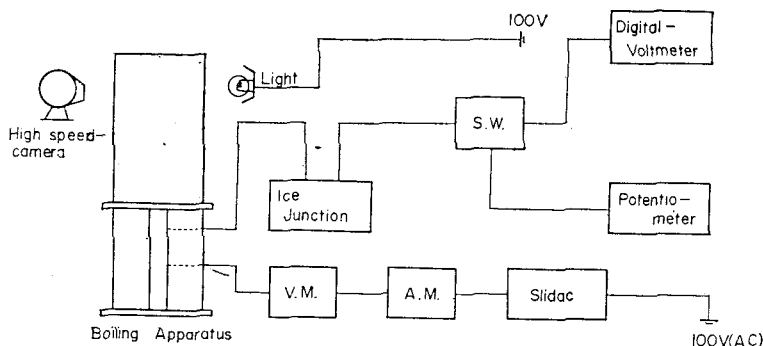


Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

Table 1. Metals used for experiment

No.	Materials	Surface Condition (Particle dia. μ)	Thickness (mm)
B	Bronze metal	Polishing (Emery 4/0)	2.0
S-1	Sintered metal	12.8	2.2
S-2	Sintered metal	32	2.1
S-3	Sintered metal	64	2.0
S-4	Sintered metal	128	2.3
S-5	Sintered metal	256	2.1
S-6	Sintered Metal	448	2.0
S-7	Sintered metal	769	2.8

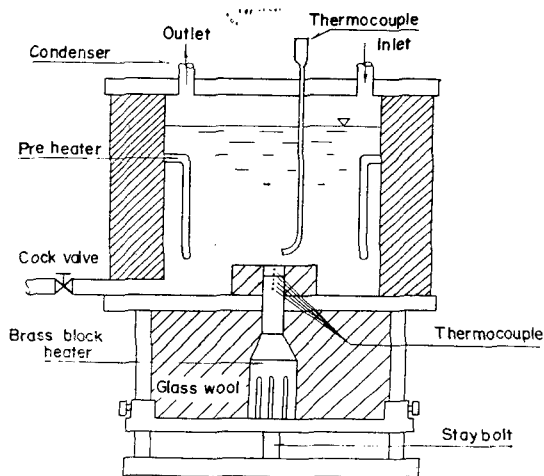


Fig. 2. Boiling Apparatus

부의 銅棒으로 傳達되는 熱流가 正常狀態가 되기를 기다려서 各點의 溫度를 測定하였으며 이때의 所要時間을 約 1.5時間으로 잡았다. 溫度計測은 每實驗마다 同一熱流束에 대해서 30分 간격으로 2회에 걸쳐서 測定하였으며 同時에 可視窓을 통해서 各경우의 沸騰現象을 觀察하였다.

本 實驗은 大氣壓下에서 熱流束 $30 \times 10^4 \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \sim 5 \times 10^4 \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 의 범위에서 實施하였다. 傳熱面의 크기는 一邊 15 mm의 正四角形이며 이주위에는 直徑 50 mm, 두께 10 mm의 Teflon 板을 써서 둘러쌓게 하여 周邊에서의 熱移動損失이 最小가 되게 하였다.

傳熱面으로 傳達되는 熱流束은 銅棒上端으로 부터 1 mm, 5 mm, 15 mm, 되는곳에 銅棒의 中心軸까지 直徑 1 mm의 구멍을 뚫고 여기에 삽입된 I-C (0.32 ϕ mm) 熱電對로부터 測定된 溫度差를 써서 Fourier의 식에 代入하여 구하였다. 또한 傳熱面 表面溫度는 傳熱面 中央部에 삽입된 C-C 熱電對 (0.1 ϕ mm)에 의하여 測定하였다. 이때 溫度測定을 위해서 사용한계기는 YOKOGAWA 製(日本)의 D-C Potentiometer와 Digital-Voltmeter였다. 그리고 每回 實驗할때마다 傳熱面은 蒸溜水와 Aceton으로 세척하여 건조시켜서 사용하였다.

3. 核沸騰熱傳達의 整理式

3-1. 整理式的 誘導

本 實驗에서는 液體가 飽和溫度일때의 Pool 沸騰에 대해서 생각한다. 그리고 傳熱의 Model로서는 傳熱面に 인접하는 一定한 過熱度의 過熱層과 이것에 接하는 液體層을 생각하여 傳熱面에서 發生한 氣泡은 이 過熱層內에서만 成長한다고 가정한다. 지금 半徑 R_1 의 發生初期의 氣泡이 傳熱面에서 半徑 R_0 까지 成長하여 다시 過

熱層內에서 R_u 까지 成長한다고 보고, 이層內에서 一定한 過熱度 ΔT 를 가정하면 Forster and Zuber⁹⁾에 의해서 유도된 方程式에 의하여 氣泡의 成長을 記述할수 있다.⁷⁾

$$R_i = \frac{2\sigma T_s(r_i - r_o)}{J, r_o \cdot r_i \cdot L(T_w - T_s)} \quad (1)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{(T - T_s)^2 \cdot C_i^2 \cdot r_i^2 \cdot \pi \cdot a}{2RL^2 r_o} \quad (2)$$

溫度 T_w 인 傳熱面에서의 發生初期의 氣泡半徑은 위의 (1)식이 되며 溫度 T 인 液體中の 半徑 R 의 氣泡成長率은 (2)式으로 表示된다.

이때 (2)式은 氣泡의 單位面積當 液體로부터 氣泡로 傳熱되는 傳熱量의 比率을 나타내는 식이며 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{Q_{ob}}{A_b} = L \cdot r_o \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{(T - T_s)^2 C_i^2 r_i^2 \pi \lambda}{2 \cdot R \cdot L \cdot r_o} \quad (3)$$

最大半徑 R_u 에 到達한 氣泡는 傳熱面에 주어진 熱을 가져가게 된다. 즉,

$$Q = n \cdot f \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R_u^3 \cdot L \cdot r_o \quad (4)$$

마찬가지로 半徑 R 의 氣泡에 의해서 移動되는 熱量 Q_b 는

$$Q_b = n \cdot f \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot L \cdot r_o \quad (5)$$

따라서 (4)式과 (5)式에서 다음식이 成立된다.

$$Q = Q_b \left(\frac{R_u}{R} \right)^3 \quad (6)$$

(3)式을 써서 (6)式을 整理하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{Q}{A} = \frac{(T - T_s)^2 \cdot C_i^2 \cdot r_i^2 \cdot \pi \cdot \lambda}{2 \cdot R \cdot L \cdot r_o} \left(\frac{Q_b}{Q} \right) \left(\frac{R_u}{R} \right)^3 \left(\frac{A_b}{A} \right) \quad (7)$$

3-2. 整理式의 適用

(7)式은 本實驗에 있어서는 發生初期의)傳熱面上的 氣泡에 適用하게 되므로 다음條件에 의해 修正되어야 한다.

즉, I) $T = T_w$

II) $Q_{ob}/Q_b = 1$

III) $A_b = A_{bi}$

IV) $R = R_i$

여기서 (1)式을 다시 (7)式에 適用하면 結局 다음式을 얻는다.

$$\frac{Q}{A} = \frac{J \cdot \lambda \cdot C_i \cdot r_i^2}{\sigma \cdot T_s (r_i - r_o)} \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{R_u}{R_i} \right)^3 \left(\frac{A_{bi}}{A} \right) (T_w - T_s)^3 \right] \quad (8)$$

따라서 本實驗에서 求하고자 하는 係數, 즉, 氣泡形成의 特性과 더불어 表面條件을 包含하는 X_b 를 생각하면 (8)式은 다음과 같이 表示된다.

즉

$$X_b = \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{R_u}{R_i} \right)^3 \left(\frac{A_{bi}}{A} \right) \right] \quad (9)$$

로 놓으면 다음 식이 된다.

$$\frac{Q}{A} = \frac{J \cdot \lambda \cdot C_i \cdot r_i^2}{\sigma \cdot T_s (r_i - r_o)} \cdot (X_b) (T_w - T_s)^3 \quad (10)$$

4. 整理式 및 實驗結果의 考察

4-1. 整理式의 考察

Levy⁹⁾는 X_b 가 定數라야 한다고 생각하여 實驗結果를 整理한바 있으나 實驗點의 散亂이 심하게 나타났다.

이것은 X_b 를 定數라고 생각한데서 오는 過誤라고 생각된다.

왜냐하면 Nishikawa⁹⁾의 理論에 의하면 R_u 와 R_i 間에는 다음과 같은 關係가 成立된다는 것이 물에 대해서 實驗한 結果 確認되었다.

즉,

$$(R_u/R_i)^3 = M \cdot n^{-1/2} \cdot Y \quad (11)$$

단, $M = 900m^{-1}$

n = 氣泡生點數

Y = 傳熱面의 代表길이

따라서 (10)式과 (11)式에 의하면 X_b 는 傳熱面의 發泡點密度의 函數라고 볼수 있다. 즉 X_b 中에는 傳熱面의 表面條件에만 因子가 包含되어 있으므로 Levy⁹⁾가 말한바와 같이 實數로 생각하기는 곤란하다.

故로 X_b 는 傳熱面에서의 氣泡發生의 難易性, 즉

傳熱面 表面狀態에 의해서 變化하는 因子이며 液體가 定해지면 傳熱面의 表面條件에 의해서 左右된다고 보는 것이 妥當하다고 생각된다.

結局 모든 核沸騰熱傳達를 포함시키는 整理式에 있어서는 傳熱面 表面의 發泡性을 고려한 X_b 와 같은 係數를 實驗의으로 求함으로써 正確한 熱傳達率이 얻어지는 것으로 생각된다.

4-2. 實驗結果의 考察

Fig. 3~10으로부터 각각의 傳熱面에 대하여 核沸騰이 일어난 狀態는 鏡面에서는 約 8°C의 溫度差를 가져야 비로소 核沸騰이 나타나고 있는데 반하여, 燒結金屬面 $D_p = 32 \mu$ 에서는 溫度差가 5°C 정도로 낮아지며 또한 $D_p = 64 \mu$ 이상의 燒結金屬 傳熱面에서는 5°C 보다

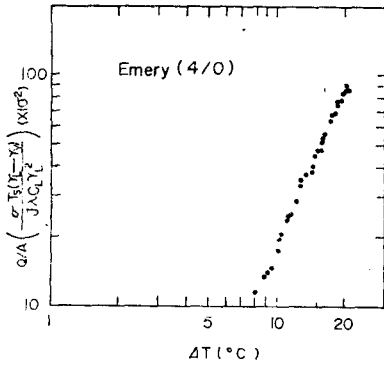


Fig. 3. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for Polishing Surface(Emery 4/0)

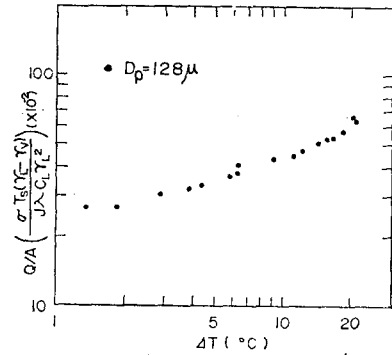


Fig. 6. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=64 \mu$

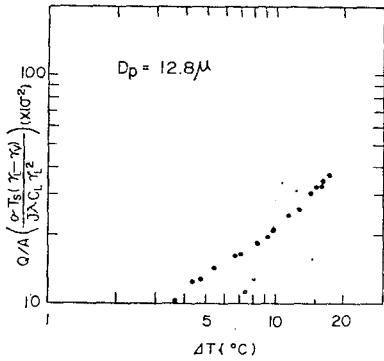


Fig. 4. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=12.8 \mu$

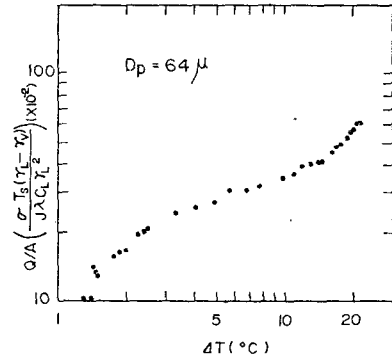


Fig. 7. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=64 \mu$

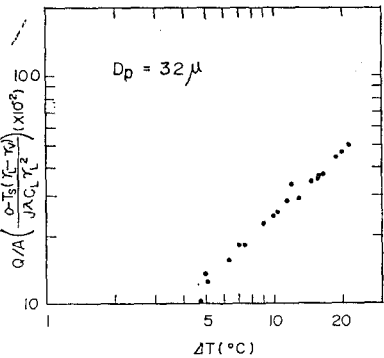


Fig. 5. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=32 \mu$

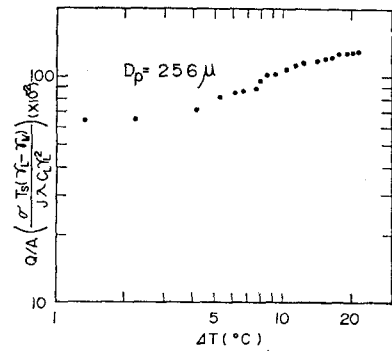


Fig. 8. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=256 \mu$

도 낮은 溫度差에서 沸騰이 開始됨을 알수 있다.

Fig. 11에 의하면 이미 낮은 溫度差에서 凝結傳熱面의 粒子의 附가가 核沸騰에 크게 影響을 미치고 있다는 사실이 나타나고 있다.

表面條件의 影響을 포함하는 係數 X_b 의 값에 對하여는 Fig. 12~19에 나타나고 있는 바와 같으며, 溫度差 $\Delta T=8^\circ\text{C}$ 와 $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 에 대한 各 凝結傳熱面에서의 X_b 의 값들을 代表的으로 比較하면 Table 2와 같다.

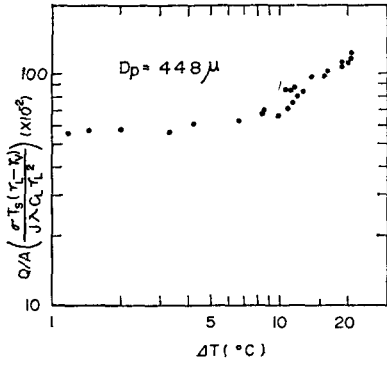


Fig. 9. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=448 \mu$

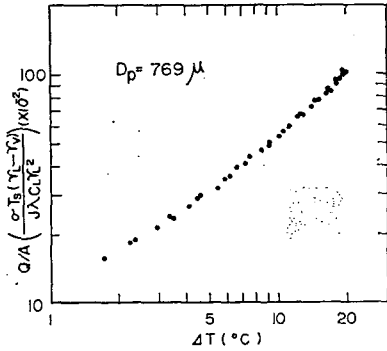


Fig. 10. Correlations of Nucleate Water Boiling Data for $D_p=769 \mu$

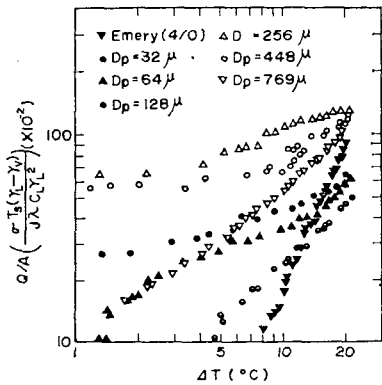


Fig. 11. Comparisons of Nucleate water boiling Data on the Various surfaces

Fig. 20과 Table 2에서 알수 있는 바와 같이 同一한 온도차에 대하여 係數 X_b 의 값은 鏡面에 比하여 燒結金屬 粒子의 굵기가 커질수록 增加하고 있으며 이 값은本 驗範圍에서는 $D_p=256 \mu$ 에 와서 最大値가 되며 이보다

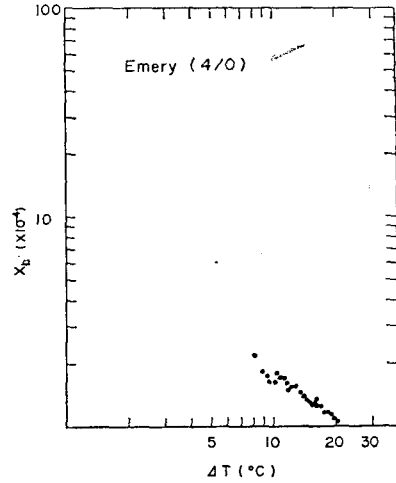


Fig. 12. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for Emery (4/0)

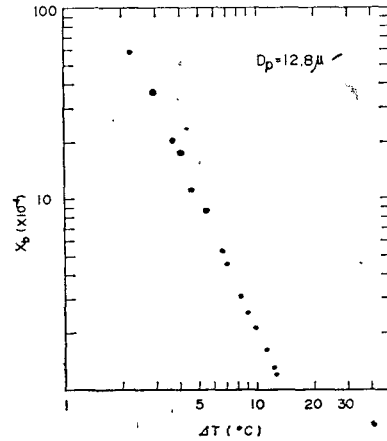


Fig. 13. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for $D_p=12.8 \mu$

粒子가 굵은 傳熱面에서는 다시 減少한다.

이것은 燒結金屬의 粒子의 크기에 따라 形成되는 傳熱表面의 凹凸部의 構成이 氣泡發生을 위한 溫度差와 粗度에 限界點을 갖고있기 때문이라고 생각된다.

Fig. 20에 의하면 全實驗範圍의 溫度差에 대하여 모든 燒結金屬 傳熱面에서의 係數 X_b 의 값은 거의 같은 比率로 增加하고 있다. 熱工學的인 立場에서 볼때 核沸騰 熱傳達은 낮은 溫度差에서 높은 熱傳達效果를 기대하는 것이 바람직한 것이며, 따라서 이에 대한 研究는 많은 關心속에 現在도 進行되고 있다.

그러나 本 實驗結果에 의하면 낮은 溫度差에서 燒結

Table 2.

ΔT	Surface Conditions (D_p) : μ	X_b	ΔT	Surface Conditions (D_p) : μ	X_b
8°C	Emery (4/0)	2×10^{-4}	10°C	Emery (4/0)	1.5×10^{-4}
	12.8	4×10^{-4}		12.8	2×10^{-4}
	64	6×10^{-4}		64	3×10^{-4}
	128	8×10^{-4}		128	4.1×10^{-4}
	256	15×10^{-4}		256	9×10^{-4}
	448	12×10^{-4}		448	7.2×10^{-4}
	769	8×10^{-4}		769	5×10^{-4}

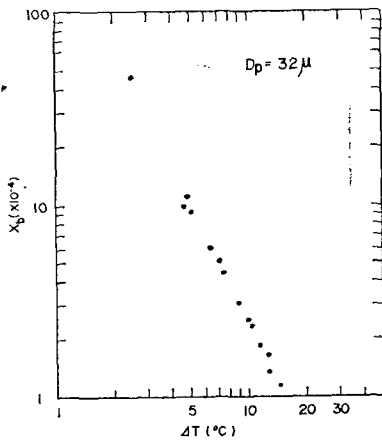


Fig. 14. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for $D_p=32 \mu$

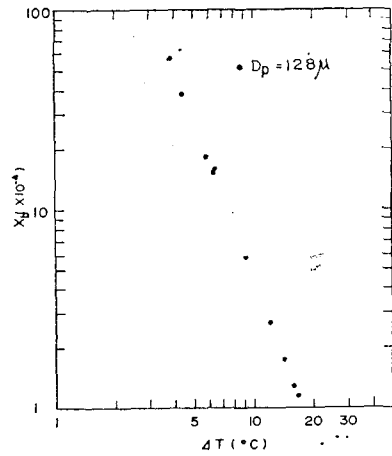


Fig. 16. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for $D_p=128 \mu$

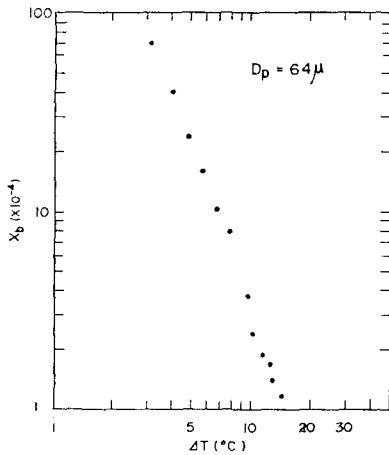


Fig. 15. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for $D_p=64 \mu$

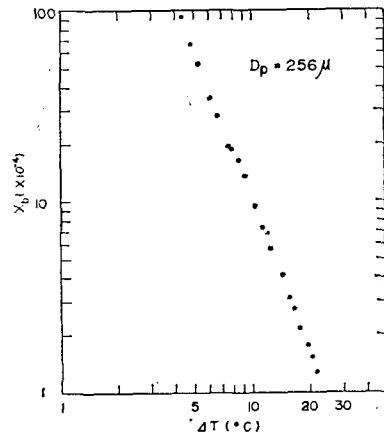


Fig. 17. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for $D_p=256 \mu$

金屬 傳熱面에서의 X_b 의 값은 增加하고 있으며 이것은 곧 熱傳達率의 增大을 가져오게 하는 것이다.

따라서 本實驗에서와 같이 傳熱面의 表面條件을 人爲的으로 變化시켜 줌으로써 위에서 말한 目的에 부합시

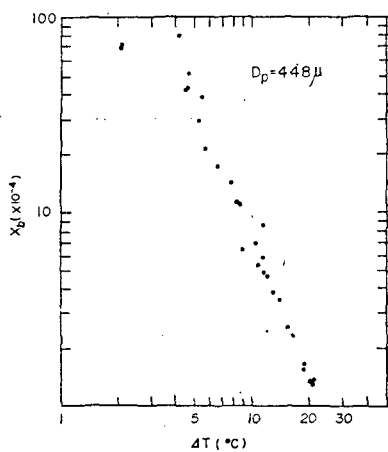


Fig. 18. Determination of Coefficient $1/X_b$ From Boiling Heat Transfer Data for $D_p=448 \mu$

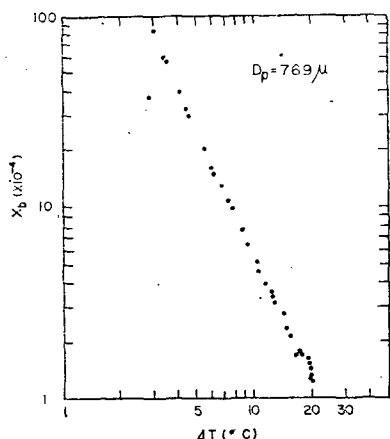


Fig. 19. Determination of Coefficient $1/X_b$ from Boiling Heat Transfer Data for $D_p=769 \mu$

킬수 있을 것으로 생각하며, 以上の 實驗結果와 考察에 따라 整理하면 다음과 같은 事項들로 判明된다.

1) Levy가 提唱한 바와 같이 燒結金屬面을 傳熱面으로 하는 沸騰熱傳達에서 係數 X_b 의 값은 一定하게 나타나지 않고 있다.

2) 鏡面[Emery(4/0)]에서의 X_b 값은 $(1.5 \sim 2) \times 10^{-4}$ 의 比較的 적은 範圍에 있다(Fig. 11)

3) 鏡面에서의 그값에 비하여 燒結金屬에서의 X_b 의 값의 變化는 Fig.에 나타나는 바와 같이 크게 變化한다 (Table 2).

4) X_b 와 ΔT 의 關係로 부터 (Fig. 4~10)

a) 燒結面일 때는 鏡面の 경우(Fig. 3)에 비하여

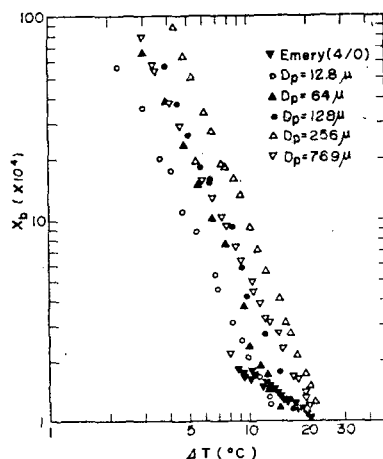


Fig. 20. Comparison of Coefficient $1/X_b$ on the Various surfaces.

낮은 溫度差일수록 X_b 의 영향이 크게 나타나며 특히 低溫度差에서의 氣泡發生頻度和 密度가 高溫度差에서 보다 커진다는 것을 意味하고 있다. 즉 熱傳達率은 沸騰初期에서 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

b) 粒子徑이 큰 燒結金屬面일수록 ΔT 의 영향보다 X_b 의 영향이 크게 나타나지 마는 Fig. 8~10에서 볼 수 있는 바와 같이 $D_p=256 \mu$ 이상일 경우는 X_b 의 값은 감소하는 경향이 있다.

이는 表面條件이 傳熱效果에 미치는 영향의 範圍가 粒徑에 따라 限定된다는 것을 말한다.

5. 結 論

鏡面[Emery(4/0)]과 7種의 粒子徑으로된 燒結金屬面을 傳熱面으로 하는 蒸留水에 대한 大氣壓下의 核沸騰 實驗에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

① 實驗結果의 解析으로부터 係數 X_b 는 傳熱面の 性狀이 核沸騰에 미치는 영향을 나타내는 特性因子임을 알 수 있다.

② 鏡面에서 係數 X_b 는 $(1.5 \sim 2) \times 10^{-4}$ 의 값으로 表示된다.

③ 燒結金屬面에서의 係數 X_b 의 값은 鏡面に 比하여 크게 變하고 있으며, 이것은 傳熱面の 表面條件이 傳熱效果의 영향에 크게 作用함을 알 수 있다.

④ 粒徑이 $D_p=256 \mu$ 이상인 燒結傳熱面에서의 係數 X_b 의 값은 감소하며 이와 같은 사실로 부터 傳熱效果를 向上시키는 데는 最適의 表面條件이 存在함을 알 수 있다.

後 記

本 研究는 仁荷大學校 부설 産業科學技術研究所의 研究補助費에 의하여 이루어 졌으며 본 著者는 學校當局의 研究費지급에 대해 감사하는 바입니다. 또한 實驗을 하는데 助力하여준 仁荷大學校 機械工學科 熱工學研究室에 근무하는 助教 여러분께, 그리고 data 整理 및 圖表製作에 協力하여준 慶熙大學校 채연석씨에게 아울러 사의를 포함합니다.

參 考 文 獻

1. E. T. Sauer et al, Mech. Engg., Vol. 60, p669 (1931).
2. J. Y. Seo, K. S. M. E. Vol. 13, No. 3, pp219-333 (1973).
3. K. S. Yamagata and K. Y. Nishikawa, J. S. M. E. Vol. 18, No. 76, pp23-27 (1952).
4. Ibid. pp28-32(1952).
5. M. Jakob, and W. Fritz, Forschung, Bd 2, S. 435 (1931).
6. H. K. Foster and N. Zuber, J. Appl. Phys. Vol. 25, pp474-478 (1954).
7. M. S. Plesset and S. A. Zwick, J. of Phys. Vol. 25, pp493-500 (1954).
8. S. Levy, A. S. M. E. Vol. 81, pp37-42 (1959).
9. K. Y. Nishikawa, J. S. M. E. Vol. 10, No. 100, pp 808-815 (1954).