論 文

各種蒸着金屬面의 凝縮熱傳達에 關한 硏究

趙鉉琪*, 李基雨,* 朴永載,* 趙明濟 *

(1986年 5月 16日 接受)

A Study on Condensation Heat Transfer to Some Evaporated Metal Surface

Shi Gie Jho*, Ki Woo Lee* Young Jae Park*, Myong Jae Cko *

ABSTRACT

Condensation heat transfer can be classified in dropwise condensation and filmwise condensation, and for the industrial purpose, the former is more useful than the latter because of the higher heat transfer rate.

But it is difficult to maintain the dropwise condensation continuously since most of the metal surfaces become wetted after exposure to a condensing vapor over an extended period of time.

To maintain dropwise condensation continuously, various surface coatings and promotors have been used recently, but these methods must be reconsidered about the durability of condensing surface.

Therefore, in this study, evaporating method of various pure metals on the condensing surface has been performed to maintain dropwise condensation.

The results have showed that the heat transfer rate of silver evaporating surface is higher than any other metal evaporating in dropwise area. Transition temperature and filmwise condensation curves are uniform regardless of kinds of evaporating metals.

〈記 號〉

d 傳熱面 直徑 mm

λ 熱傳導率 W/m°K

h 熱傳達率 W/m²°K

δ 液膜의 두께 m

q 平均 表面通過 熱流束 W/m²

v 蒸氣速度 m/sec

$\triangle T$ sat. 傳熱面 過熱度 °K

$\triangle T$ sub. 傳熱面 過冷度 °K

* 正會員, 動力資源硏究所 機器開發硏究室

1. 序 論

蒸氣가 低溫의 傳熱面에 接觸하면 潛熱을 放出하고 凝縮하는 傳熱現象을 凝縮熱傳達이라고 하며, 滴狀凝縮과 膜狀凝縮의 두 가지 形態로 大別할 수 있다. 特히, 熱傳達率이 큰 滴狀凝縮熱傳達은 工業的으로도 대단히 重要한 意味를 가지고 있기 때문에 그 複雜한 傳熱現象의 機構解明을 위해 지금까지 많은 硏究가 되어 왔다.

一般的으로 沸騰熱傳達은 1934年 抜山[1]에 의해 처음 發表된 沸騰曲線, 즉 橫軸을 傳熱面 過熱度, 縱軸을 熱流束으로 하였을 때, Fig.1과 같이 對流-核-遷移-膜沸騰의 N字 모양의 曲線으로 잘 說明될 수 있다. 그러나 凝縮熱傳達은 그 支配하는 因子가 너무 많고 熱流束과 過冷度의 發生技術 때문에 沸騰曲線이 發表된 40年後인 1974年에야 武山[2]에 의해 처음으로 Fig.2와 같은 凝縮曲線의 全貌가 發表되었다. Fig.2의 凝縮曲線도 滴狀-遷移-膜-氷狀의 凝縮 領域으로 區別되고 沸騰曲線의 4領域과 잘 比較되어지고 있다. 또 滴狀凝縮 領域에서 極大値를 나타내는 것은 核沸騰에서 極大値를 가지는 것과 잘 一致하고 있다.

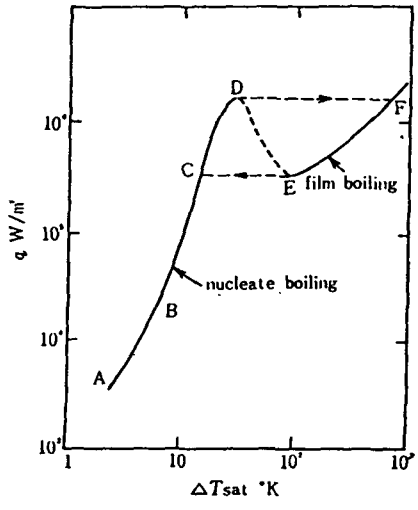


Fig.1 Boiling Curve

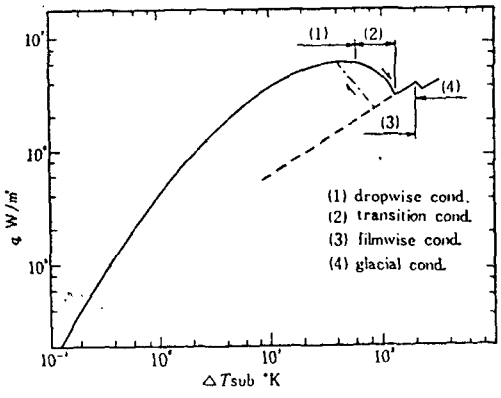


Fig.2 Condensation Curve

滴狀凝縮은 1930年 E.Schmidt[3]等에 의해 처되고 있으며, 傳熱面이 撥水性이고 傳熱面의 過冷度가 어느 範圍 以下일 때 發生하고, 傳熱面上의 液滴은 自己成長과 合體에 의해 體積이 增加되어 重力에 의하여 落下한다. 이 滴狀凝縮은 膜狀凝縮에 比하여 數倍에서 10倍 정도의 높은 熱傳達率을 나타내기 때문에 滴狀凝縮이 膜狀凝縮에 比해 대단히 有效한 것을 알 수 있다. 그러나 滴狀凝縮에 미치는 因子가 많고, 그 機構가 複雜하기 때문에 各 硏究者가 求한 結果를 一括的으로 比較할 수는 없다.

膜狀凝縮은 1916年 W.Nusselt[4]에 의해 理論解析的인 方法으로 膜狀凝縮의 熱傳達에 影響을 끼치는 各 因子를 定量的으로 把握하였다. 그 後 Jakob[5], 藤井[6] 等에 의해 擴張, 修正되고 層流, 亂流의 膜狀凝縮에 展開되어 現在에 이르고 있다.

그러나 위의 두 가지 傳熱現象은 傳熱面 過冷度를 廣範圍하게 變化시키면 滴狀-遷移-膜-氷狀凝縮으로 一連의 遷移現象이다.

高熱傳達 領域인 滴狀凝縮을 長時間에 걸쳐 持續시키기 위한 促進劑 또는 表面處理 方法의 開發은 滴狀凝縮의 實用化에 있어서 가장 重要한 課題이다. 지금까지 實驗室 規模 또는 工業的 規模의 兩面을 包含하여 固體面上에서 滴狀凝縮을 持續시키기 위해서 쓰여지고 있는 方法을 分類하면 다음과 같다.

첫째로는 促進劑를 미리 凝縮面上에 付着시키는 方法, 둘째는 促進劑를 蒸氣中에 混入시키는

方法, 세째는 凝縮面上에 無氣化合物의 被膜을 만드는 方法, 네째는 凝縮面上에 貴金屬의 被膜을 만드는 方法, 그리고 마지막 다섯째로는 凝縮面上에 有機高分子의 被膜을 만드는 方法이 있다.

여기서, 本 硏究는 滴狀凝縮 促進劑로써 銅面에 여덟 種類의 純金屬을 各各 眞空蒸着시킨 傳熱面의 凝縮曲線을 求하여 各種 蒸着金屬面의 凝縮熱傳達에 對한 傳熱特性을 밝히는 것을 目的으로 한다.

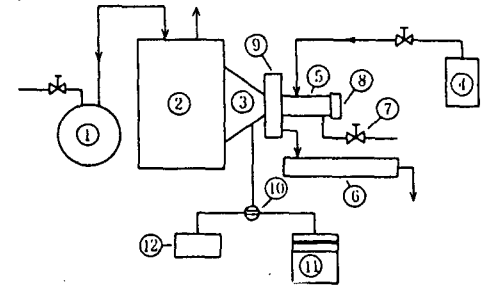
2. 實驗裝置 및 方法

2-1 實驗裝置

實驗裝置의 槪略을 Fig.3에 나타내고 있다. 먼지 傳熱블럭 冷却用 液體窒素 ①을 壓縮空氣로 불어 冷却상자 ②에 넣는다. ②에 들어온 液體窒素는 傳熱블럭 ③을 冷却시켜 傳熱面의 過冷度를 調節할 수 있게 되었다.

液體窒素는 沸點이 대단히 낮기 때문에 높은 過冷度를 發生시킬 수 있고, 過冷度가 낮은 範圍에서는 液體窒素 대신에 冷水를 使用하였다. 蒸氣는 보일러 ④에서 發生시켜 蒸氣室 ⑤를 거쳐 傳熱블럭 ③에 裝置되어 있는 傳熱面에 直角으로 부딪히게 되어 있다. 良質의 蒸氣를 얻기 위해서 물은 증류수를 使用하였고, 보일러는 Stainless로 特別히 製作하였다. 傳熱面에서 凝縮되지 않는 蒸氣는 凝縮器 ⑥에서 凝縮시켜 傳熱面에서 凝縮된 凝縮液과 合하여 蒸氣流速을 求하였다. 凝縮樣相은 觀察窓 ⑧을 通하여 觀察 및 寫眞撮影을 하였다.

傳熱블럭은 Fig.4와 같이 直徑 15mm, 頂角 90度의 圓錐台形으로 傳熱面으로부터 Fig.4에 나타낸 거리에 네 개의 φ0.6 구멍을 中心軸上까지 뚫어, C-A thermocouple을 挿入하여 傳熱블럭 內의 溫度를 測定하여 熱流束 및 傳熱面 溫度를 求하였다. 傳熱面과 傳熱블럭 斷熱材 사이의 境界에는 알루미늄劍을 붙여 液滴 또는 水膜이 連續的으로 흐르도록 하였다



① Liquid N_2
② Coolant casing
③ Heat transfer block
④ Boiler
⑤ Steam chamber
⑥ Condenser
⑦ Drain valve
⑧ Sight window
⑨ Illuminating window
⑩ Select switch
⑪ Pen recorder
⑫ Digital voltmeter

Fig.3 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

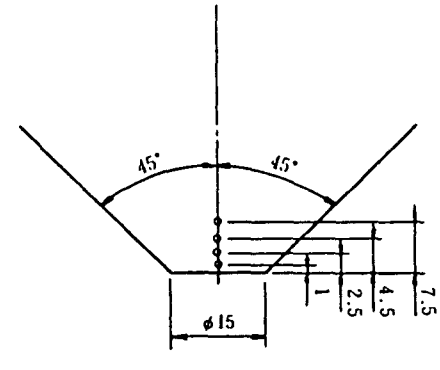


Fig.4 Size of Heat Transfer Block

實驗은 傳熱面을 傳熱블럭에 裝着한 뒤, 곧 蒸氣를 發生시켜 約 90分 程度의 豫備運轉을 거친 後에 開始하였다. 또 實驗은 液體窒素 注入後 氷狀凝縮이 끝날 때까지 約 1時間에 걸쳐서 하였고, 準定常狀態로 測定하였다. 實驗中에 傳

熱블럭 ③의 起電力을 Pen Recorder ⑪에 記錄하였다.

2-2 眞空蒸着 方法

本 實驗에서는 眞空蒸着法에 의하여 凝縮傳熱面에 金屬의 被膜을 만들었다. 이 때의 順序는,먼저 傳熱面을 1500番 耐水硏磨紙 및 1μm, 0.1μm의 Alumina粉으로 硏磨하여 純水로 세척한 뒤, 묽은 鹽酸, Acetone으로 脫指하여 蒸着裝置에 裝着시켜 眞空蒸着을 하였다. 蒸着된 傳熱面은 곧 實驗裝置로 옮겨져 實驗에 들어갔다.

2-3 熱流束 및 表面溫度 決定 方法

圓錐台形의 母線을 延長하여 얻어지는 圓錐의 假想頂點에서 測定한 各 thermocouple 까지의 半徑 r의 逆數와, 그 位置의 溫度와의 關係는 直線으로 近似할 수 있다. 이것은 Fig.5 에서 알 수 있는데, 本 實驗에서 使用하는 傳熱블럭 內의 各 測定點, 즉 傳熱面에서 거리 1,2.5,4.5,7.5mm에 있는 實測點과 假想頂點에서 이 點까지의 거리 r의 逆數와 잘 一致하고, 또 이 點들이 一直線上으로 되는 線形性인 것에서 表面溫度는 이 線의 延長에서 求할 수 있다.

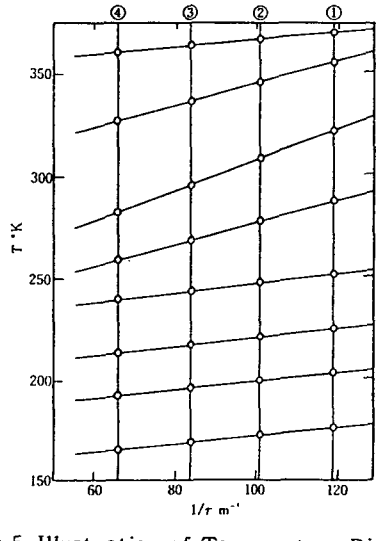


Fig.5 Illustration of Temperature Distribution in Heat Transfer Block

熱流束의 決定은 다음과 같은 方法으로 하였다. 즉, 單位時間에 半徑 r의 球面(面積 A)을 通過하는 熱量 Q는

$$Q=-A\lambda\frac{dT}{dr}=A\lambda\frac{1}{r^2}\frac{dT}{d(1/r)} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, 面積 A는 頂角 90度의 圓錐台形일 때

$$A=\pi r^2(2-\sqrt{2}) \quad \cdots\cdots (2)$$

이다. 따라서 傳熱面의 表面熱流束 q는 傳熱面 半徑을 r_0로 하면

$$q=\frac{2-\sqrt{2}}{r_0^2}\lambda\frac{dT}{d(1/r)} \quad \cdots\cdots (3)$$

로 求할 수 있다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1 從來의 硏究와 比較

Fig.6은 從來의 硏究結果와 本 實驗裝置에서 얻은 實驗結果를 比較하기 위한 것이다. 그림 중의 點線은 Nusselt 理論에서 求한 값으로 傳熱面 直徑 $d=5$mm, $d=15$mm의 膜狀凝縮을 나타내고 있다. 먼저 本 實驗에서 使用하는 傳熱面 $d=15$mm에 滴狀凝縮 促進劑를 전혀 使用하지 않고 蒸氣를 流速 $v=3.3$m/sec로 하였을 때 傳熱面의 凝縮現象은 膜狀凝縮이 일어났다. 이 때의 實驗値를 Nusselt 理論値에 比하여 약간 큰 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또 그림 중에서 武山가 報告한 傳熱面 直徑 $d=5$mm 蒸氣流速 $v=2.2$m/sec일 때의 實驗値와 本 硏究의 實驗値를 比較하면, 本 硏究의 實驗値가 武山의 實驗値에 比하여 낮은 熱流束을 나타내고 있다. 이것은 傳熱面과 그 周圍 斷熱材와의 境界의 影響에서 오는 것이라 생각할 수 있는데, 一般的으로 傳熱面의 直徑이 작을수록 影響을 크게

받는다. 이것은 武山의 膜狀凝縮 實驗値가 Nusselt 의 傳熱面 直徑 $d=5$mm의 理論値보다 2배 以上 큰 값을 나타낸 것에서도 傳熱面 크기의 影響을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 前述한 바와 같이 本 實驗에서 使用하는 直徑 $d=15$mm의 傳熱面은 膜狀凝縮에서 Nusselt 의 理論値에 상당히 接近하는 結果로부터 武山가 使用한 傳熱面보다 더 妥當한 것으로 생각할 수 있다. 여기서, 이들 結果를 傳熱面 過熱度와 熱傳達率과의 熱傳達率과의 關係를 나타낸 것이 Fig.7이다. Fig.7에서도 알 수 있는 바와 같이 本 實驗에서 使用하는 傳熱面의 膜狀凝縮 熱傳達率도 Nusselt 의 理論値에 가까운 것을 알 수 있다.

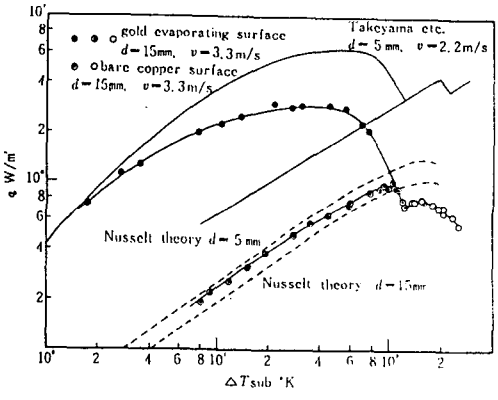


Fig.6 Comparison of Experimental Results and Study in the Past

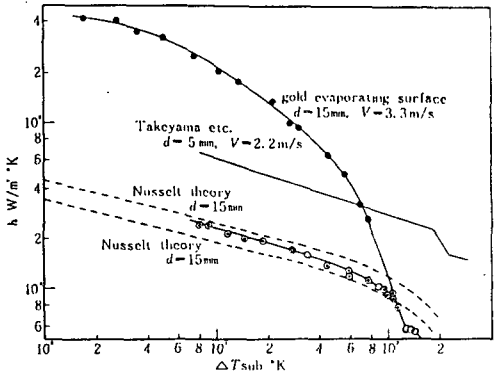


Fig.7 Relation of Subcool Temperature and Heat Transfer Factor

그리고, Fig.8은 Nusselt 의 膜狀凝縮 理論値를 本 實驗에서 使用하는 傳熱面 $d=15$mm에 對해 求한 것으로 熱流束 q, 平均 熱傳達率 h_m, 그리고 液膜의 두께 δ의 關係를 나타내고 있다. 過冷度의 增加에 따라서 熱流束이 顯著히 增加하는 것을 알 수 있다.

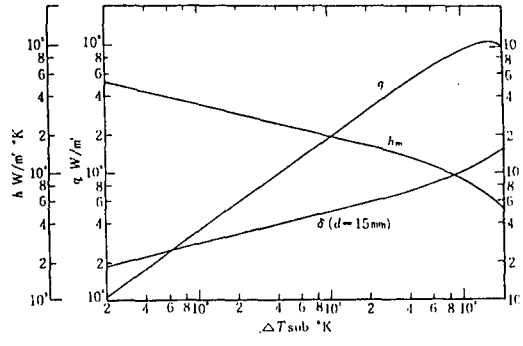


Fig.8 Theoretical Value of Nusselt in Film-wise Condensation ($d=15$mm)

3-2 結果 및 考察

本 實驗에서는 蒸氣流速 $v=6.6$m/sec(一定)로 7種類의 金屬蒸着面을 傳熱面으로 한 凝縮曲線을 求했다. 즉, Fig.9와 같이 傳熱面의 過冷度와 熱流束의 關係를 求하였다.

金, 銀, 銅, 그리고 니켈의 蒸着面에서는 全面 滴狀凝縮이 確認되었으나, 銅裸面에서는 滴狀凝縮은 確認되지 않고 膜狀凝縮에서 시작되어 氷狀凝縮으로 遷移現象이 일어났다. 아연, 티탄 알루미늄의 蒸着面은 蒸氣를 加하면 蒸着金屬膜이 쉽게 벗겨져 測定不能으로 되었다. 이것은 金屬에 따른 蒸着技術의 問題로 생각되어진다.

金, 銀의 各 蒸着面에 있어서 兩者는 거의 같은 凝縮曲線을 나타내나, 滴狀凝縮 領域에서 銀蒸着面이 金蒸着面에 比해 약간 높은 熱流束을 나타낸다. 여기서, 滴狀凝縮 部分의 熱流束이 膜狀凝縮의 熱流束보다 約 5～6倍 높다. 그러나 武山의 實驗値보다 낮은데, 이것은 傳熱面 크기의 影響으로 武山가 使用한 傳熱面 直徑이 5mm

인 데 반하여 本 實驗에서 使用한 傳熱面 直徑이 15mm로 傳熱面 境界에서 큰 影響을 받기 때문으로 생각된다.

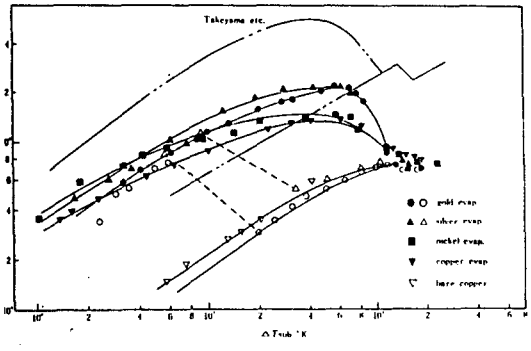


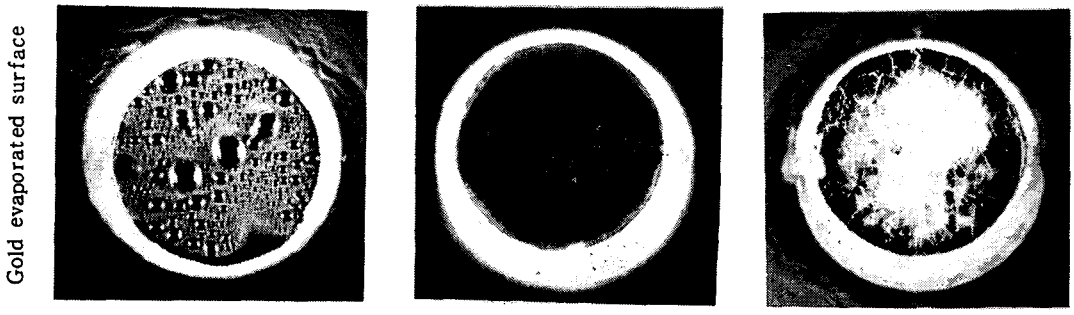
Fig.9 Condensation Curves of Each Metal Evaporated Surface

銅, 니켈의 各 蒸着面에 있어서 滴狀凝縮 部分의 熱流束이 金, 銀의 蒸着面보다 낮은 값을 나타내는데, 膜狀凝縮 部分 以後는 金, 銀의 熱流束値와 잘 一致하고 있다. 이것은 滴狀凝縮 領域에서, 金, 銀의 蒸着面에서 離脫液徑이 1.8mm 前後인데, 銅, 니켈은 2.2mm 前後로 全體的인 滴의 크기가 크기 때문에 蒸着面에서 熱傳導가 작은 물이 차지하는 比率이 크게 된 점과 물層의 두께가 增加한 것이 熱流束을 낮추는 原因이라고 생각할 수 있다.

銅裸面에서는 滴狀凝縮은 일어나지 않고 過冷度가 작은 範圍에서 全面 膜狀凝縮으로 되고 過冷度가 큰 領域에서는 곧 氷狀凝縮으로 되었다.

한편, 金과 銀의 경우에 逆過程, 즉 過冷度를 낮추어 가는 方向으로 熱流束을 測定하여 凝縮曲線을 求하면, 過冷度를 높혀 가는 方向에서의 滴狀에서 膜狀으로 遷移溫度가 80°K 근방인 것에 比하여 逆過程에서는 過冷度가 抵下한 20~30°K에서 膜狀에서 滴狀으로 遷移하였다. 여기서 過冷度를 높혀 가는 方向에서는 遷移하는 데 時間이 걸리고 서서히 不規則的인 膜狀 部分이 커져서 膜狀凝縮으로 遷移하고, 이것은 肉眼으로도, 또 Pen Recorder로도 觀察할 수 있으나 逆過程에서는 一瞬間에 膜狀에서 滴狀으로 遷移하였다

各 蒸着金屬에서의 滴狀-膜狀-氷狀 凝縮의 樣相 및 銅裸面에서의 膜狀-氷狀의 樣相을 寫眞으로 考察하면 다음과 같다 (Fig 10 참조).



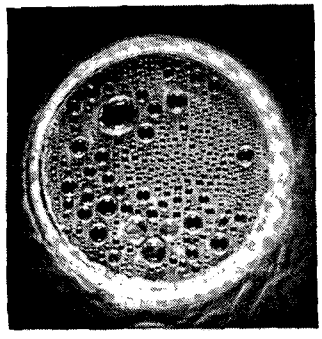
△Tsub.= 3.13 × 10⁰ °K
q = 5.55 × 10⁵ W/m²

△Tsub.= 1.16 × 10² °K
q = 9.66 × 10⁵ W/m²

△Tsub.= 1.96 × 10² °K
q = 7.22 × 10⁵ W/m²

a. Gold Evaporated Surface

Silber evaporated surface



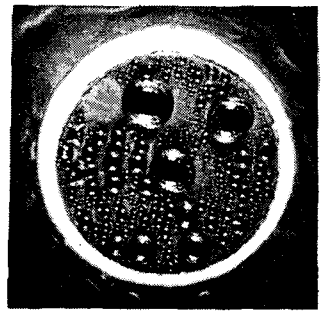
$\triangle T_{sub.} = 2.10 \times 10^{0}$°K
$q = 6.35 \times 10^{5}$ W/m²
Dropwise Condensation

$\triangle T_{sub.} = 1.24 \times 10^{2}$°K
$q = 8.87 \times 10^{5}$ W/m²
Filmwise Condensation

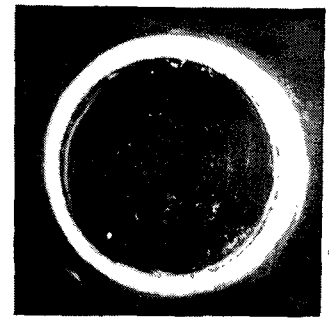
$\triangle T_{sub.} = 1.62 \times 10^{2}$°K
$q = 7.6 \times 10^{5}$ W/m²
Glacial Condensation

b. Silber Evaporated Surface

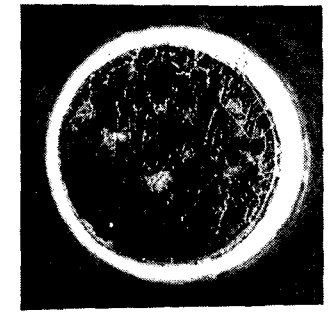
Nickel evaporated surface



$\triangle T_{sub.} = 1.82 \times 10^{1}$°K
$q = 5.73 \times 10^{5}$ W/m²



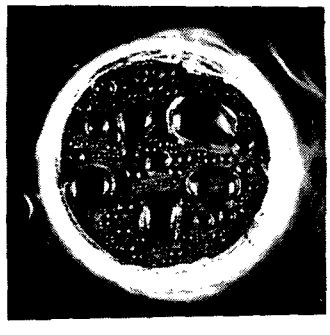
$\triangle T_{sub.} = 1.25 \times 10^{2}$°K
$q = 9.06 \times 10^{5}$ W/m²



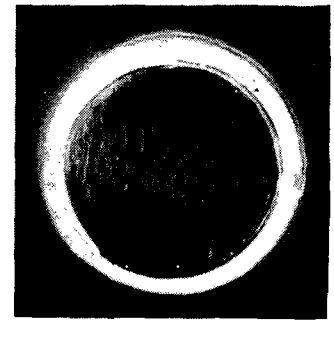
$\triangle T_{sub.} = 1.96 \times 10^{2}$°K
$q = 7.45 \times 10^{5}$ W/m²

c. Nickel Evaporated Surface

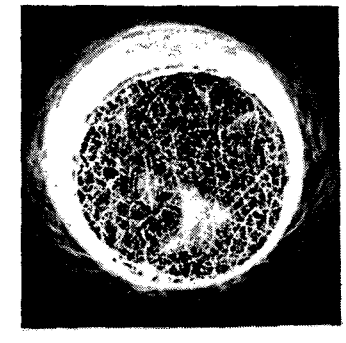
Copper evaporated surface



$\triangle T_{sub.} = 1.01 \times 10^{1}$°K
$q = 2.60 \times 10^{5}$ W/m²
Dropwise Condensation



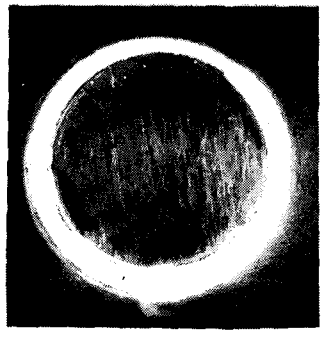
$\triangle T_{sub.} = 1.19 \times 10^{2}$°K
$q = 9.21 \times 10^{5}$ W/m²
Filmwise Condensation

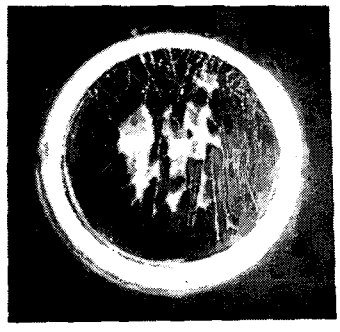


$\triangle T_{sub.} = 2.04 \times 10^{2}$°K
$q = 7.39 \times 10^{5}$ W/m²
Glacial Condensation

d. Copper Evaporated Surface

Copper bare surface





$\triangle T_{sub.} = 2.14 \times 10^{1}$°K
$q = 3.46 \times 10^{5}$ W/m²

Filmwise Condensation

$\triangle T_{sub.} = 1.58 \times 10^{2}$°K
$q = 7.42 \times 10^{5}$ W/m²

Glacial Condensation

e. Copper Bare Surface
Fig.10 Photograph of Specimen

4. 結 論

本 實驗에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 金屬 蒸着面을 利用하여 高熱傳達 領域인 滴狀凝縮을 實現할 수 있다. 그 중에 銀을 蒸着하였을 때가 金, 아연, 니켈 등 다른 金屬을 蒸着한 것보다 높은 熱傳達率을 얻을 수 있었다. 따라서 銀蒸着面은 高熱傳達을 實現할 수 있어 凝縮傳熱面으로 應用할 수 있다.

(2) 蒸着傳熱面은 過冷度를 높혀 가는 過程에서 모두 遷移溫度가 80°K 근방인데, 이것은 蒸着金屬의 種類에 關係 없이 거의 一定하다.

(3) 모든 金屬 蒸着面에 있어서 膜狀凝縮 部分 以後의 凝縮曲線이 거의 一致하고, 이것도 蒸着金屬의 種類에 關係가 없다.

感 謝 文

本 硏究는 1985 年度 科學技術處 基本硏究事業費로 修行되었기에 感謝를 表한다.

參 考 文 獻

1. 抜 山 : 日本機械學會誌 37(1934),367
2. 武山, 清水 : Proc.5th Int. Heat Transfer Conf.,3(1974), 274
3. Schmidt, E., 外 2名 : Techn. Mechan. u Thermodyn., 1(1930), 53
4. Nusselt, W.,: Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes, Z. VDI,(1916), 60
5. Jakob,M.,: Mech. Engng., 58(1936), 729
6. 藤 井 ; 傳熱工學の 進展 (昭 48) 1. 養賢堂