沸騰熱伝達に及ぼす管群の効果について*

(第1報, 基礎実験の結果)

河合素直**, 古川 卓***, 渡瀬稔彦***
吉末龍夫†, 町山忠弘††Experimental Investigations of the Effects of Tube Bundles
on Boiling Heat Transfer
(1st Report, Experimental Results)by Sunao KAWAI, Takashi FURUKAWA, Toshihiko WATASE,
Tatsuo YOSHISUE, and Tadahiro MACHIYAMA

For tube bundles of flooded evaporators, boiling heat transfer coefficients are improved by upward streaming vapor bubbles. The authors tried to clarify the relations between boiling heat transfer characteristics of single tubes and those of tube bundles. In this report, boiling heat transfer characteristics of low-finned-tubes are investigated, using bundles of 4 horizontal tubes in a vertical row with side walls. Experimental results are summarized as follows: (1) when the clearance between tube and side wall is larger than 5 [mm], the effects of side walls on boiling heat transfer of tube bundles cannot be recognized; (2) bundle effects are affected both by the heat flux of the tube itself and by the total heat flux of the lower tubes; (3) the heat flux increase by upward streaming vapor bubbles has maximum value at wall superheat 5 [K] for 15~90 [kW/m²] of total heat flux of the lower tubes.

Key Words: Phase Change, Boiling Heat Transfer, Flooded Evaporator, Low-Finned-Tube, Tube-Bundle

1. 緒 言

いわゆる省エネルギーなどの観点から, 伝熱管の性能向上に関する試みが多方面で継続的に行われている。管外で被加熱流体が沸騰蒸発する形式の蒸発器は, 冷凍空調用ばかりではなく, 低温度熱源を利用する低沸点媒体用蒸発器など注目すべきものが多い。そして, これら用途に高性能沸騰用伝熱管が種々開発されている⁽¹⁾。沸騰用伝熱管を管群として液滴式蒸発器に使用する場合, 下方伝熱管から発生する上昇気泡の影響によって単管のときよりも沸騰熱伝達率が向上することがよく知られている。

このように, 伝熱管を管群に組み込んだときの沸騰熱伝達特性すなわち管群効果については, 古くは Myer ら⁽²⁾が3列16本の管配列で平滑円管とローフィンチューブとを対象に実験を行い, 管群効果により単管時よりも沸騰熱伝達率が向上し, この向上の程度

は低熱流束時ほど著しいことを報告している。そして, その後多くの研究が発表されているが, まだ管群効果を定量的な形で推定しうる段階には達していないようである。他方, 管群効果のメカニズムを解明しようとする試みとしては, 中島⁽³⁾の研究があり, そこでは気泡と伝熱面の間に形成される薄液膜の存在が大きな役割を果たすとしている。また, 藤田ら⁽⁴⁾は上昇気泡流が問題の伝熱管の気泡境界層に及ぼす効果として管群効果をとらえようとしている。しかしながら, これらの研究も, まだ管群効果を一般的な形で定量的に説明するまでには至っていないようである。

著者らは, 各種沸騰用伝熱管の固有の特性ともいえるべき単管の特性についてはすでに報告した⁽⁵⁾。そこで, 次のステップとして, 沸騰用伝熱管の単管時の熱伝達特性と管群に組み込まれたときの熱伝達特性との関係を明らかにし, さらに蒸発器の設計に重要な有効な伝熱管の配列法を明らかにすべく, 実験研究に着手した。そして, まず冷凍機の蒸発器用伝熱管に多く用いられているローフィンチューブを対象に, 管群に組み込んだときの沸騰熱伝達特性に及ぼす因子について実験的に詳細に検討した結果, いくつかの新しい知見を得ることができたので, その結果を抄報する。

* 昭和61年6月27日 北陸信越支部北陸地方(金沢)講演会において講演, 原稿受付 昭和60年9月4日。

** 正員, 早稲田大学理工学部 (〒160 東京都新宿区大久保3-4-1)。

*** 学生員, 早稲田大学大学院。

† 古河電気工業(株) (〒660 尼崎市道意町7-6)。

†† 正員, 日本工業大学 (〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)。

2. 実験の概要

2.1 実験装置の概要 実験装置全体図を図1に、管群効果測定用蒸発器を図2に示す。蒸発器で加熱されて蒸発した冷媒は、密度差により凝縮器に達し、ここで凝縮して再び蒸発器へ戻る自然循環形式である。本実験では、縦1列横4段でピッチ24 mmに固定し、伝熱管としては、ローフィンチューブ（フィン数：26枚/25.4 mm, フィン外径：18.72 mm, フィン高さ：1.45 mm）を対象とした。なお、本実験では縦1列としているが、これは予備実験の結果で側列の影響は発生する気泡流量の1/2が影響するものとして扱えることが確認できたからである。また、上昇気泡の影響を定量的に規定し得るように、ガラスによる側壁を設けてあり、この側壁と伝熱管との間げきは変えることができる。

2.2 実験の方法 従来の研究の多くは、沸騰熱伝達率の向上を熱流束との関係で整理する際に、下方の伝熱管の熱流束をとくに規定する意図がないために、その結果を一般化するのが困難なことが多い。そこで、上昇気泡の影響という形で管群効果を把握するためには、上昇気泡の流量を規定することによって測定伝熱管の沸騰熱伝達特性が単管時の特性からどのように変化するかに注目して実験を行った。

本実験では、測定伝熱管の管壁温度、冷媒の飽和温度と飽和圧力および各伝熱管ヒータへの供給電力を測定した。伝熱管管壁温度は測定伝熱管表面にコンスタンタン線を溶接し、銅・コンスタンタン熱電対を構成

し、これにより検出している。熱電対の起電力は、自動平衡記録計により定常状態を確認したのち、デジタル電圧計により測定する。また、実験条件は次のように定めた。冷媒 R-11 を用い蒸発圧力は 49 kPa すなわち蒸発温度 35.5 °C と設定した（これは凝縮器冷却水の温度と流量を操作することによって一定に保つことができる）。

3. 実験結果とその整理

実験では、冷媒の圧力と温度、測定伝熱管の管壁温度ならびにヒータへの供給電力を測定した。この測定結果をもとに、熱特性値を次のように算出した。

(1) 熱流束 加熱量はヒータへの供給電力より算出する。加熱量を $Q[W]$ とすると、

$$Q = EI \cos \varphi \quad [W] \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 E ：印加電圧 $[V]$ 、 I ：電流 $[A]$ 、 $\cos \varphi$ ：力率。

供試伝熱管の管外表面積は、外径を基準にした表面積 $A_o[m^2]$ を用いる。これは、フィン加工伝熱管などでは、実表面積を求めることが困難なために、各種伝熱管と比較することを考慮して、このように外径基準の表面積 $A_o = \pi d_o l [m^2]$ を用いる (d_o ：外径 $[m]$ 、 l ：長さ $[m]$)。このとき、外径基準の熱流束 $q_o [W/m^2]$ は次式より算出できる。

$$q_o = Q/A_o \quad [W/m^2] \quad \cdots \cdots (2)$$

(2) 管外沸騰熱伝達率 管壁の温度は、測定伝熱管の上端、真横および下端で測定している。ここでは管壁温度測定値の相加平均をもとに管外沸騰熱伝達率を算出する。すなわち、管外沸騰熱伝達率 $\alpha_B [W/(m^2 \cdot K)]$ は、

$$\alpha_B = q/(\theta_{wm} - \theta_s) \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 θ_{wm} ：管壁温度（相加平均） $[^\circ C]$ 、 θ_s ：冷媒飽和温度 $[^\circ C]$ 。

(3) 上昇気泡の定量的規定 本実験では、ボイ

図1 実験装置概略図

図2 蒸発器詳細図

図3 実験結果

ド率、気泡上昇速度などについては測定していないので、上昇気泡の影響は上昇気泡の流量が下方にある伝熱管の加熱量の総和に比例するものと考え、これにより規定する。なお、後述するように、ここでは下方伝熱管の加熱量の総和を、測定伝熱管の伝熱面積当たりで評価することにした。

供試伝熱管について管群効果を測定した結果を図3に例示する(今後とくに断らないかぎり、側壁との間隔きが3.2 mmの結果を示す)。

4. 実験結果に対する検討

4-1 下方伝熱管の加熱位置の影響 本実験では、縦1列の伝熱管を対象に測定を行っている。下方伝熱管から発生する気泡の影響は、その気泡の発生する位置によって変化することが考えられる。このことを調べるために、測定伝熱管の直下にある伝熱管から発生する気泡の効果と、測定伝熱管との間にダミーの伝熱管をおいた場合の効果とを比較した。その結果の一例を図4に示す(側壁なく、測定伝熱管と下方伝熱管の熱流束が等しい例)。図4から明らかなように、気泡が発生する伝熱管の位置にはほとんど影響しない(この場合側壁の影響もほとんど認めることができない)。

次に、測定伝熱管の下方にある複数の伝熱管から気

図4 気泡発生伝熱管の位置の影響

図5 気泡発生伝熱管の本数の影響

泡が発生する場合について、その影響を調べた。その結果の一例を図5に示す。図5では、横軸に下方伝熱管の加熱量の総和を測定伝熱管の伝熱面積で割った値をとってある。図5から、管群効果は測定伝熱管に達する気泡の総量に対応すると考えてよいことがわかる。

以上の結果より、本実験の範囲については、気泡が発生する位置、気泡が発生する伝熱管の本数には関係なく、単に下方伝熱管から発生する気泡の量に比例すると考えられる下方伝熱管加熱量の総和によって、管群効果を考えることがわかる。

4-2 側壁の影響についての検討 ここで、側壁と伝熱管との間隔きの影響について注目する。間隔きとしては、側壁と伝熱管との最小間隔きを用いることにする。実験結果より、下方伝熱管加熱量の総和を媒変数にとって測定伝熱管の沸騰熱伝達率を間隔きとの関係で整理したものの一例が図6である(測定伝熱管の熱流束は15[kW/m²]一定)。図6から明らかなように、間隔きが5 mm以上では側壁の影響はほとんどない。このことより、発生した気泡はほぼ鉛直に上昇し、わきにはほとんどそれないものと考えることができる。したがって、間隔きが5 mm以上であれば側壁の影響はほとんど考慮しないでよいものと考えることができる。また、上昇気泡の影響を一般化するために、最小間隔きをもとにした流路面積当たりで上昇気泡の流量を評価するのは適当でないこともわかる。また、間隔きが極端に狭くなると熱伝達率が向上する傾向があるが、下段の加熱量が55 kW/m²までの本実験の範囲では熱伝達率が低下する傾向は認めることができなかった。

4-3 管群効果について 下方伝熱管の加熱量を固定したときの、測定伝熱管の沸騰熱伝達率と熱流束との関係を表した実験結果(図3)に注目すると明らかなように、下方伝熱管の加熱量の総和が大きくなるにつれて熱伝達率の値が大きくなる傾向がある。そし

図6 側壁の影響

図7 熱流束の増加分と過熱度との関係

て、測定伝熱管の熱流束が比較的大きなときでも、上昇気泡による沸騰熱伝達率の向上はかなり大きいことがわかる。このことから、ローフィンチューブはフィンの構造から上昇気泡の影響を広い範囲にわたって大きく受けるものと推察される。

以上では、測定伝熱管の熱伝達率を、測定伝熱管の熱流束との関係で調べてきた。実際に使用する場合には、むしろ過熱度を規定して考えるほうが、沸騰熱伝達率の向上を把えやすい。そこで、測定伝熱管について同一過熱度のもとで管群効果をみることにする。いま、管群効果による熱流束の増加分 Δq_r [W/m²] を次のように定義する。

$$\Delta q_r = q_{AT} - q_{IT} \quad [\text{W/m}^2] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 q_{AT} : 管群で過熱度 ΔT のときの熱流束 [W/m²], q_{IT} : 単体で過熱度 ΔT のときの熱流束 [W/m²]。そして、この熱流束の増加分 Δq_r を過熱度との関係で表したものが図7である。図7から明らかなように、熱流束の増加分が最大値をとる過熱度は約5 Kであり、過熱度がこの値を超えると Δq_r は減少する傾向がある。

以上の事実をもとに下方伝熱管で発生した上昇気泡の影響を考えると、下方伝熱管の加熱量の総和が一定のもとでも、熱流束の増加分がある過熱度で最大値をとり、過熱度がそれよりも高くなると熱流束の増加分が減少することにより、上昇気泡の影響を単に対流の効果として考えることは妥当でないと考えられる。すなわち、熱流束の増加分が最大値をとる点に対応する過熱度よりも低い領域では、まず上昇気泡による対流の効果が現れ、つぎに気泡と伝熱面との間に形成される薄膜膜の存在により沸騰熱伝達が促進される。そして、過熱度がピークをとる値よりも高くなると、伝熱

管自身から発生する気泡により構成される境界層が支配的になり、単管時の特性に近づく(熱流束の増加分は零に近づく)ものと考えることができる。

5. 結 言

以上に、沸騰用伝熱管の単管時の沸騰熱伝達特性と管群に組み込んだときの沸騰熱伝達特性との関係を明らかにすることを目的に行った基礎実験の結果について抄述した。そして、本実験の範囲について次の結果をえることができた。

(1) 従来、管群効果は低熱流束時に大きいといわれていたが、本実験によってローフィンチューブでは20 kW/m²程度の高熱流束時においても管群効果によって、条件によっては50%以上の沸騰熱伝達率の向上があることを明らかにすることができた。

(2) 下方から発生する気泡量すなわち下方伝熱管の加熱量の総和を一定とすると、過熱度一定のもとにおける測定伝熱管の熱流束の単管に対する増加分に注目すると、上昇気泡の流量にかかわらず、過熱度が約5 Kでこの熱流束の増加分は最大値をとる。このことから、過熱度に注目することによって管群効果を定量的に整理できる見通しをえることができた。

(3) 伝熱管最外周と側壁との間げきが管群効果に及ぼす影響について調べた結果、間げきが5 mm以上になると側壁の影響がほとんどなくなることを明らかにすることができた。

管群効果を定量的に評価するために、上昇気泡の影響を、ボイド率、上昇気泡速度などによって定量的に把えることがまず必要と考え、実験の準備を行っている。その結果については後日報告の機会をもちたいと考える。

おわりに、本実験研究は早稲田大学理工学研究所と古河電気工業(株)とのプロジェクト研究の一端として行われたものであることを記して、関係各位への謝辞にかえる。

文 献

- (1) 吉末, 冷凍, 57-653 (昭57), 29.
- (2) Myers, J. W. and Katz, D. L., *Refrig. Eng.*, 60 (1952), 56.
- (3) 中島, 機論, 42-348 (昭51), 1865.
- (4) 藤田・ほか3名, 第19回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭57), 475.
- (5) 河合・町山, 早大理工研報告, 63 (昭48), 1.