冷媒の水平ら旋溝付管内蒸発流における伝熱面上の液膜状態の予測 Prediction Method of the Condition of Liquid Film on the Heat Transfer Surface in Refrigerant Evaporation inside a Horizontal Spirally Grooved Tube

○ 正 桃木 悟 (長崎大) 東井上 真哉 (九大) 北島 圭祐 (長崎大院)
磯崎 裕希 (長崎大院) 正 茂地 徹 (長崎大)

Satoru MOMOKI, Nagasaki Univ., 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki
Shinya HIGASHIUE, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-Koen, Kasuga-shi, Fukuoka
Keisuke Kitajima, Yuuki Isozaki and Toru Shigechi, Nagasaki Univ.

Experiments on the flow boiling of refrigerants inside a horizontal, spirally grooved steel tube with the 12mm average inner diameter were performed using a fluorocarbon refrigerant HCFC123. Experimental conditions were 50 to 150 kg/(m²s) in mass velocity, 0.2 MPa in pressure, and nearly 0 to 5 kW/m² in heat flux. The method to decide the flow pattern based on the condition of the liquid film on the tube surface was described using the circumstantial distribution of the wall temperatures, and the flow pattern maps were presented in the form of mass velocity versus vapor quality.

Key Words : Flow regime, Flow boiling, Gas-liquid two-phase flow, Spirally grooved tube, Liquid film

1. はじめに

内面ら旋溝付管の管内蒸発流では、溝構内に薄い液膜が形成される場合に極めて高い熱伝達特性が得られる。著者らは、熱伝達特性の整理の観点から、伝熱面上における液膜の状態にも注目して流動様相を分類する事が望ましい事を指摘し、Fig.1に示すような4種類の分類法を提案している^(1,2)。実験結果を分類するにあたって、管周方向の局所管壁温度の測定値を利用した手法を用いているが、その理論的背景を述べているものの具体的な手順については殆ど言及していなかった。そこで本報では、管周方向の局所管壁温度の測定値より、図に示した流動様相を判定する手法を説明する。さらに、著者らによる従来の実験で不足していた低圧時の分離流域のデータを補完するために、より低い流量における実験を実施したので、その結果についても報告する。

2. 実験装置および条件

実験装置や方法については、既報^(1,3)で報告しているので、その詳細については省略し、ここでは、試験区間の概要と伝熱管の諸元、温度の計測位置および実験範囲について述べる。試験伝熱管は水平に配置された外径15mm、平均内径約12.5mmの鋼管で、交流を直接通電して加熱される。試験蒸発器の外表面上には、伝熱管入り口からそれぞれ1350, 2150, 2950mmの地点において、管の同一断面上に頂部からそれぞれ60°間隔で合計18対のT型熱電対を半田付けしている。管内表面温度は、これらの測定値より半径方向の一次元熱伝導の式を用いて算出した。伝熱管はSTB-340-SC鋼で、内面にはフィン高さ高さ0.4mm、フィン数32、リード角15°のら旋溝が施されている。

著者らはこれまで、二種類のフロン系冷媒HCFC22とHCFC123を用いて、質量速度：100～300 kg/(m²·s)、圧力：

0.2～0.3 MPa (HCFC123)、0.8～1.1 MPa (HCFC22)、熱流束：0～25 kW/m²の範囲について実験を行い、流動様式および熱伝達係数を予測する式を提案している^(1,2)。しかしながら、ほぼ断熱状態のHCFC123の流動様式データが得られていない事、HCFC123に関する測定結果の約半分が環状流であった事を勘案して、HCFC123について質量速度：50～150 kg/(m²·s)、圧力：約0.2 MPa、熱流束：0～5 kW/m²について実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 伝熱面上の液膜状態の判定方法

水平管内蒸発流では、一般的に、流速が低い場合には気液が分離して流れる分離流となり、流速が速くなると液膜が管内表面を覆って流れる環状流となる。伝熱面が乾いている場合の伝熱特性は、濡れている場合のそれと較べて著しく劣るために、分離流域における平滑管内蒸発熱伝達率は、環状流の場合と較べてかなり低い値となる。一方、ら旋溝付管の場合には、ら旋流れの慣性力や溝による毛細管効果のために、平滑管では表面が乾いているような条件下では、非常に薄いメニスカス液膜によって管内表面上が覆われている事が多い。この場合には、管から流体への熱抵抗の支配的な因子である液相の熱抵抗が小さくなるため極端に高い伝熱特性が得られる。従って、内面ら旋溝付管内蒸発熱伝達の整理の観点から流動の様相を考える場合には、伝熱面が、十分に厚い液膜で覆われている場合、薄いメニスカス液膜に覆われている場合、または完全に乾いている場合の3種類をそれぞれ別の様式として取り扱う必要があるが、内視鏡による詳細な観察や圧力変動の様子からこれらを区別するのは容易ではない。著者らは、局所の伝熱面温度の測定値を利用する事で、伝熱特性の差異から液膜の状態を推測して流動様式を分類する手法を構築している。本報ではその具体的な手順を説明する。

3.1.1 伝熱管の上半分と下半分における平均温度 $\overline{T_{uh}}$ と $\overline{T_{lh}}$ 流れの乱れによって液膜の厚さは常に微妙に変化しているため、壁温の測定値にはばらつきがあり、測定した6箇所全ての個々の温度について検討するのは現実的ではない。そこで、水平管内蒸発流において周方向に液膜の状態が変化する主要因は重力である事に着目して、上半分の温度と下半分の壁温それぞれの平均値(それぞれ $\overline{T_{uh}}$ と $\overline{T_{lh}}$)を利用する事で、ばらつきの影響を低減させつつ、重力の影響を明確化する。前述の液膜の状態と伝熱特性の関係から、内

[SD]: Separated flow with dry surface, [SM]: Separated flow with liquid meniscus, [A]: Annular flow, and [AM]: Annular flow with liquid meniscus

Fig.1 Flow patterns based on the liquid film condition

面ら旋溝付管内蒸発流では、ある地点における管の上半分と下半分の温度の平均値の関係が、(1) $\overline{T_{uh}} \approx \overline{T_{lh}}$ の場合：環状流[A]もしくは薄液膜による環状流[AM]、(2) $\overline{T_{uh}} > \overline{T_{lh}}$ の場合：上部が乾いている分離流[SD]、(3) $\overline{T_{uh}} < \overline{T_{lh}}$ の場合：上部が薄液膜で覆われた分離流[SM]である事が推測される。

上記(1)の場合、 $\overline{T_{uh}}$ と $\overline{T_{lh}}$ の大小関係だけでは、環状流[A]、薄液膜による環状流[AM]、遷移域(この場合には、環状部が薄液膜で覆われた分離流から環状部が乾いている分離流への遷移)のいずれであるかを判定できない。そこで、本研究では、入口クオリティ x を変化させて複数回の実験を行い、得られた壁温のデータを併せて検討する事で、遷移域を含めた流動の様相を判定する方法を採用する。その手順を以下に例を挙げて説明する。

3.1.2 $\overline{T_{uh}}$, $\overline{T_{lh}}$ と蒸気クオリティの関係 Fig.2に示すように、測定した地点における伝熱管の上部と下部の平均温度と蒸気クオリティとの関係をプロットする。ここでは例として、図(a)に圧力 $P=0.8\text{MPa}$ 、質量速度 $G=100\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、熱流束 $q=10\text{kW}/\text{m}^2$ のHCFC22の場合の測定結果を、図(b)には圧力 2MPa 、質量速度 $G=50\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、熱流束 $q=5\text{kW}/\text{m}^2$ のHCFC123の場合の測定結果を示している。まず、図中に点線や破線で示しているように、 $\overline{T_{uh}}$ と $\overline{T_{lh}}$ の両方を1~3本の直線で整理する。次に、それぞれの直線を用いて $\overline{T_{uh}}$ と $\overline{T_{lh}}$ の大小関係について検討する。

Fig.2(a)に示すHCFC22の場合、上半分の温度 $\overline{T_{uh}}$ は1本の直線で近似できているのに対して、下半分の温度 $\overline{T_{lh}}$ はクオリティ x が0.4と0.7の近傍で傾向が大きく異なっている。 $x < 0.4$ では、 $\overline{T_{lh}} < \overline{T_{uh}}$ である事から、上部が乾いている分離流[SD]であると推測される。一方、 $x > 0.7$ の領域では、 $\overline{T_{uh}} \approx \overline{T_{lh}}$ より上部が薄液膜で覆われた分離流[SM]である。その間の $0.4 < x < 0.7$ の領域は、[SD]から[SM]への遷移域である。

Fig.2(b)の $P=2\text{MPa}$ 、 $G=50\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $q=5\text{kW}/\text{m}^2$ のHCFC123の場合、クオリティ x が0.6より小さいところでは、 $\overline{T_{uh}} > \overline{T_{lh}}$ であるので、管の上部は乾いている分離流である事が明らかである。しかしながら、 $x > 0.6$ では $\overline{T_{uh}} \approx \overline{T_{lh}}$ なので、環状流が薄液膜に覆われた環状流である。この場合は、液で満たされている管底部の温度 $\overline{T_{lh}}$ を表す直線によって、両方の温度が整理されているので、通常環状流[A]であると判定するのが妥当である。

Fig.2 Relationship of vapor quality and average wall temperatures at the upper and lower halves

Fig.3 Flow pattern maps

3.2 流動様式線図

今回の実験で得られた熱流束 q が0に近い条件下あるいは低流量条件におけるHCFC123の流動様式を質量速度-クオリティの形式でFig.3に示す。なお、測定データが少なく環状流[A]と薄液膜による環状流[AM]の区別がつかないデータがあり、それらについては[A]と[AM]それぞれの記号(□と◇)を重ねて表示している。図(a)は断熱二相流(非常に小さい熱流束)の場合、(b)は熱流束 $q=5\text{kW}/\text{m}^2$ の場合である。(b)に示すデータの一部は、既報⁽¹⁾にて公表済みのデータである。また、図には東井上ら⁽¹⁾による流動様式の予測式より求めた境界値を実線([A]-[SM])、破線([SM]-[SD])、[SD]側および一点鎖線([SD]-[SM])、[SM]側にて示している。なお、(a)の q が小さい場合には、[SM]-[SD]境界について現実的な値が算出されなかったため図示していない。(a)(b)のいずれの場合においても低クオリティ域では、 G が100から50に減少する間に管上部の薄いメニスカス液膜が形成されなくなり、管の上部が乾いている分離流となる。既報で⁽²⁾示したHCFC22の場合と較べると予測値と測定値の偏差が大きい傾向がみられ、予測式の改良は今後の課題である。

4. おわりに

平均内径12mmのSTB-340-SC鋼製の内面螺旋溝付管を用いてフロン系冷媒の管内蒸発流における伝熱面温度の測定を行い、伝熱特性の変化を利用して流動様式を推測す手法を整理した。質量速度50~150 kg/(m²·s)、圧力：約0.2 MPa、熱流束：0~5 kW/m²のHCFC123について追加実験を行い、得られたデータについて流動様式線図を作成した。

参考文献

- (1) 東井上ら, 冷空論 23(2), 121(2006).
- (2) Momoki et al.: Annals of the Assembly for IHTC 13, MPH-32(2006).
- (3) 桃木ら, 第39回伝熱シンポジウム講演論文集, 671(2002).