D134

気泡微細化を伴うサブクール流動沸騰 (円管流路の長さとの除熱限界)

Subcooled Flow Boiling with Microbubble Emission (Effect of length of circular tube on cooling limit)

○学 佐藤 真也 (東理大院) 正 鈴木 康一 (東理大)
Masaya Sato and Koichi Suzuki, Tokyo University of science, 2641 Yamasaki, Noda, Chiba

Highly subcooled flow boiling of water was performed for a horizontal circular channel with 5mm in diameter and 50mm in length of heating section. Microbubble emission boiling (MEB) occurred in the upstream section of heating surface and the heat flux increased at higher liquid velocity than 0.25m/s. The maximum heat flux was $4.5 \sim 5 \text{ MW/m}^2$ in the upstream section of 5~15mm apart from the edge of the heating surface at 40K of liquid subcooling and 1.0 m/s of liquid velocity. However, the local heat flux decreased gradually in the down stream section and the liquid is almost evaporated at the exit of heating section. The experimental results show that MEB is difficult to occur for longer sized heating surface than 15 mm.

Key Words: Subcooled flow boiling, Transition boiling, Circular channel, MEB, Long heating surface, High heat flux

1. まえがき

近年、コンピュータのCPUを始めとする電子素子の性能向上と共に、発熱密度も増加している。将来ハイブリッドカーや電気自動車に用いられる電力変換用電子機器の発熱密度は 200 W/cm^2 と 300 W/cm^2 と予測されている。このような高熱流束の除熱には、沸騰冷却が有効と考えられるが、除熱限界である限界熱流束(CHF: Critical Heat Flux)を超えると制御不能な遷移沸騰を経て高温の膜沸騰に移行し、バーンアウト(焼切れ)を起こす危険があるため、電子機器の冷却には困難とされてきた。

最近、高サブクール流動沸騰において、遷移沸騰領域で通常の限界熱流束よりも熱流束が高い気泡微細化沸騰(MEB)の発生が報告されている^{(1)~(3)}。その熱流束は 10 MW/m^2 以上にも及ぶ⁽⁴⁾。MEBは上述の高熱流束除熱に期待できるが、現在 $40 \text{ mmL} \times 10 \text{ mmW}$ までの平板伝熱面⁽⁵⁾および長さ 10mm の円管伝熱面⁽⁶⁾の小さい伝熱面について得られたものである。

本研究は内径 5mm、長さ 50mm の伝熱面を有する円管流路にサブクール流動沸騰を行わせ、MEBを含む除熱特性について調べたものである。

2. 実験

テストセクションは図1に示すように銅ブロックと円管で構成され、円管の直径 5mm、伝熱面長さ 50mm である。加熱は円周上に 35 本のカートリッジヒーターを挿入して行った。伝熱面の端から 5mm, 15mm, 25mm, 35mm, 45mm の位置に、伝熱面から 3mm, 7mm, 11mm の距離で直径 0.5mm のシーケンス K 型熱電対を挿入し温度を測定した(図2)。局所伝熱面過熱度および局所熱流束は測定した温度分布から求めた。

実験装置の概略を図3に示す。液体には蒸留水を用い高温槽とテストセクションの間をフローメーター、フィルター、マントルヒーターを通して循環させた。液体のサブクール度はテストセクション入り口で設定温度から 3K 以内に維持し、管内流速は流量と円管の断面積から計算した。流路出口のバルブを調整し、テストセクションの流路内を大気圧に保持した。

3. 結果および考察

3.1 短い(10mm)長さの伝熱面のサブクール流動沸騰

テストセクション入口のサブクール度が 30K 以上におい

て管径 5mm、10mm 共に安定した MEB が発生した。実験結果の例として、サブクール度 40K、流路内平均流速 0.25m/s および 1m/s の沸騰曲線を図4および図5に示す。図4および図5において、流速が 0.25m/s の遅い場合、図4

Fig.1 Test section

Fig.2 Measuring points in heating block
Heating surface; $\phi 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ in length

Fig.3 Experiment arrangement
1.Cooler 2.Thermometer 3.Heater 4.Water pump
5.Regulating valve 6.Flow meter 7.Filter 8.Mantle heater
9.Manometer 10.A/D converter 11.Regulating valve

に示すように管径 10mm の熱流束は 5mm の熱流束よりも高いが、流速が増加するにつれてその差は小さくなり、図 5 に示すように、流速 1m/s においては管径の違いによる熱流束の差はほとんど見られなくなる。流速が遅い場合は、質量流量による凝縮効果が支配的になり、流速が早くなるにつれて伝熱面上の気泡の除去効果が大きくなっていくものと考えている。

3.2 長い(50mm)長さの伝熱面のサブクール流動沸騰

直径 5mm, 長さ 50mm の伝熱面では、上流端から 5mm, 15mm, 25mm, 35mm および 45mm における局所伝熱面過熱度および熱流束を測定した。サブクール度 30K, 流速 0.25m/s および 1.0m/s の結果を図 6 および図 7 に示す。

0.25m/s の低流速では、図 6 に示すように、サブクール度が 20-40K において MEB の明確な発生は確認できなかった。さらに加熱を続けると、伝熱面温度が急上昇し膜沸騰に移行する傾向がみられた。

流速 1m/s の高流速では、図 7 に示すように、伝熱面上流部(5mm, 15mm)において MEB が発生し、CHF 後に熱流束が増加している。しかし、伝熱面下流側では伝熱面の温度上昇に伴い熱流束が減少している。

円管流路で 10mm より長い伝熱面の場合、伝熱面下流のサブクール度が減少し、下流部では MEB が発生しなくなる。また、流速が遅くなるとさらにその傾向は強くなる。管直径が 5mm の場合、流速 1m/s では伝熱面長さは 15-20mm 程度が MEB 発生限界と考える。

Fig.4 Boiling curves for different channels with 5mm and 10mm diameter at 40K of liquid subcooling and 0.25m/s of liquid velocity

Fig.5 Boiling curves for different channels with 5mm and 10mm diameter at 40K of liquid subcooling and 1m/s of liquid velocity

4. まとめ

短い伝熱面では気泡微細化沸騰は発生し易いが、長い伝熱面ではサブクール度 30K, 管内平均流速 1.0m/s で発生するが、短い伝熱面の場合に比べて気泡微細化沸騰は発生しにくい。また、気泡微細化沸騰が発生して高熱流束が期待できるのは、伝熱面上流側で、上流端から 15mm を過ぎたあたりから、熱流束は減少し、膜沸騰に移行しやすい。

円管流路にサブクール水を通して気泡微細化沸騰を発生させ、高熱流束を期待する場合、伝熱面(冷却部)の長さは、15mm~20mm 以下でないと難しい。

本研究は、日本学術振興会の平成 14 年度~16 年度科学研究費補助金によって行われたものである。

文 献

- (1) Fujibayashi, et al., *Trans. JSME*, Vol.51, No.463, pp.919-926 (1985).
- (2) Kubo, R., et al., *Trans. JSME*, Vol.58, No.546, pp.497-502, (1992).
- (3) 鈴木他 4 名, 機論 B Vol.65, No.637, pp.3097-3104 (1999).
- (4) Kumagai S, et al., *Proc. 6 th ASME-JSME Thermal Engineering Conf.* CD-ROM, TED-AJ 03-219 (2001).
- (5) Suzuki, K., et al., *Annals of New York Academy of Sciences*, 974, pp.364-377 (2003).
- (6) Suzuki K., et al., *Proc. 1st Intl. Symp. Micro-Nano Tech.*, CD-ROM V1-01.(2004).

Fig.6 Local boiling curves for long heating surface at 30K of liquid subcooling and 0.25m/s of liquid velocity

Fig.7 Local boiling curves for long heating surface at 30K of liquid subcooling and 1.0m/s of liquid velocity