超音波による飽和プール核沸騰熱伝達促進*

中山 昭 男^{*1}, 鹿 野 松太郎^{*2}Enhancement of a Saturated-Pool Nucleate-Boiling Heat Transfer
by Ultrasonic Vibrations

Akio NAKAYAMA and Matutaro KANO

The effect of ultrasonic vibrations on a saturated-pool nucleate-boiling heat transfer in the presence and absence of glass beads in distilled water as the working fluid is investigated under reduced pressure. Ultrasonic energy of 140 W with a frequency of 20 kHz expose the flat heated surface of 20 mm in diameter, which is immersed in the saturated working fluid. The heat-transfer coefficient with glass beads in distilled water is larger than that without glass beads, and up to a four fold increase in the heat-transfer coefficient is obtained in this experimental condition. The heat-transfer coefficient increases with the decrease of system pressure, but it decreases with the increase of heat flux. Observation by 35 mm photographs elicits some considerations on the mechanism.

Key Words: Heat Transfer, Heat-Transfer Enhancement, Boiling, Saturated-Pool Nucleate Boiling, Ultrasonic Vibration, Reduced Pressure, Glass Bead

1. 緒 言

伝熱促進を得ようとする試みは、熱エネルギーの有効利用の見地から非常に重要である。そこで、現在までに、種々な伝熱促進法が提案されている。そして、その一方法として、超音波法によるものがあり、精力的に研究されているが、まだ、未解決な点も多い。

ところで、超音波による伝熱促進に関する主な研究は次のような実験的研究がある。まず、Wong ら⁽¹⁾の大気圧の自然対流熱伝達下およびサブクール核沸騰熱伝達下における実験では、周波数 20.6~306 kHz, 振動子への電気入力 15.6~160 W の超音波をメタノールおよび水中の白金細線伝熱面に照射した結果、自然対流域で最高 8 倍、サブクール核沸騰域で 2~3 倍の伝熱促進効果を得ている。しかし、熱流束の増加とともに伝熱促進効果は減少している。Hoshino ら⁽²⁾の大気圧の自然対流熱伝達下における実験では、周波数 28 kHz, 強度 0.1 W/cm² でキャビテーション発生のない超音波を水中の円柱伝熱面に照射した結果、最高

1.3 倍の局所伝熱促進効果を得ている。Bergles ら⁽³⁾の大気圧以上の強制対流熱伝達下における実験では、周波数 70, 80 kHz, 強度 0.05~2.8 W/cm² の超音波を二重円管中の水加熱管に照射した結果、最高 1.4 倍の局所伝熱促進効果を得ている。しかし、その後、過熱度の増加とともに伝熱促進効果は減少している。Kam ら⁽⁴⁾の大気圧のサブクール核沸騰熱伝達下における実験では、周波数 20 kHz, 音圧 17.7~67.1 kPa の超音波を水中の白金細線伝熱面に照射した結果、約 2 倍の伝熱促進効果を得ている。そして、伝熱促進に及ぼす臨界音圧の存在することを指摘している。Schmidt ら⁽⁵⁾の減圧下のフラッシュ蒸発における実験では、周波数 26 kHz, 振動子への電気入力 40 W の超音波を伝熱面のないフラッシュ蒸発系に照射した結果、最高 1.6 倍の伝熱促進効果を得ている。しかし、過熱度の増加とともに伝熱促進効果は減少している。飯田ら⁽⁶⁾の大気圧の飽和プール膜沸騰熱伝達下における実験では、周波数 28 kHz, 振動子への電気入力 5.1~33.6 W の超音波をエタノール中の白金細線伝熱面に照射した結果、約 2 倍の伝熱促進効果を得ている。

以上のように、超音波による伝熱促進に関する研究は存在するものの、超音波による飽和プール核沸騰熱伝達促進に及ぼす圧力依存を検討した研究は見あたら

* 平成元年 11 月 21 日 九州支部・中国四国支部合同長崎地方講演会において講演、原稿受付 平成元年 4 月 19 日

^{*1} 正員、九州産業大学工学部(〒813 福岡市東区松香台 2-3-1)。

^{*2} 正員、(〒813 福岡市東区名島 5-32-2)。

ない。そこで、本研究は、新たに超音波による飽和ブール核沸騰熱伝達促進効果に及ぼす圧力依存を供試液として、蒸留水中に少量のガラスビーズを入れた場合と入れない場合について実験的に検討した。なお、ガラスビーズを用いたのは、同粒子を添加することによる伝熱促進効果を検討するためである。

2. 実験装置および実験方法

図1は実験装置概略を示す。円筒ガラス容器⑮内に蒸留水を入れ（液位 100 mm）、低圧下で煮沸脱気したのち、真空ポンプ⑮にて所定の圧力にし、なお、そのときの蒸留水の保温はバンド加熱器⑭にて行った。伝熱面温度および熱流束は伝熱棒⑪にうめ込んだ3本のシース外径 0.5 mm アルメルクロメル熱電対の熱起電力より得られる温度の温度こう配と伝熱棒の熱伝導率より求めた。また、伝熱棒の加熱はニクロム線⑨に交流を通じて行い、十分定常状態にした。なお、直径 20 mm の伝熱面⑩と超音波発振体③に取付けた直径 20 mm のステンレス製振動子先端間の距離は 35 mm とし、また、振動子中心と伝熱面中心が一致するように設置した。その際、振動子が蒸留水中に挿入されている長さは 65 mm である。

実験は熱入力一定のもとで、超音波照射無しで定常状態にし、その後、超音波照射を行い、再び定常状態を待った。そして、段階的に熱入力を増加させ、そのときの熱流束および過熱度を求め、同時に蒸気泡様相の変化を 35 mm カメラ⑬で撮影した。また、伝熱面は実験ごとに 1500 番のエメリーペーパーで仕上げた。実験条件は伝熱面圧力が 8.0, 13.3, 40.0 kPa および 101.3 kPa の 4 種類で、また、超音波の振動子入力の本超音

波ホモジナイザ（共振周波数 20 kHz, 電ひずみ形, 日本精機製）における最大出力の 140 W と最小の 0 W の 2 種類である。一方、蒸留水中にガラスビーズ平均粒径 49 μm を 0.25 g 入れた場合と、入れない場合の 2 種類を行った。なお、このガラスビーズ 0.25 g の水量に対する容積割合は約 120 p. p. m である。

3. 実験結果および考察

3.1 蒸留水中にガラスビーズを入れない場合の超音波照射による熱伝達係数増加に及ぼす圧力依存

図2 超音波照射による熱伝達係数の変化
(ガラスビーズを入れない場合)

図3 超音波照射による熱伝達係数の変化
(ガラスビーズを入れない場合)

図1 実験装置概略

図2および図3は蒸留水中にガラスビーズを入れない場合の例として、圧力 $P_s=8.0$ および 101.3 kPa のとき、熱伝達係数 h に及ぼす振動子入力 $P=140$ W (○印) と $P=0$ W (●印) の結果を示す。図2, 3より、熱流束 q の増加とともに、 h に及ぼす超音波照射の影響は小さくなっている。

図4は蒸留水中にガラスビーズを入れない場合の超音波照射による熱伝達係数促進比 h/h_0 に及ぼす圧力依存性を示す(図4のプロット点は実験結果の平均値を示す)。なお、この場合の h は振動子入力 $P=140$ W のときの熱伝達係数、 h_0 は $P=0$ W のときの熱伝達係数である。図4より、同一の q においては、 P_s の減少とともに h/h_0 は大きくなっている。このことより、本伝熱促進法を減圧下で用いると工業的見地からは、より有効であることがわかる。

3.2 蒸留水中にガラスビーズを入れない場合の超音波照射による蒸気泡様相の変化 図5は減圧下の $P_s=8.0$ kPa において、超音波照射がない場合の蒸気泡様相を示す。また、図6は同圧力で、 $q=0$ W/m² のとき、飽和液温において、 $P=140$ W のキャビテーション気泡の成長気泡を示す。なお、参考までに、同圧力の室液温 (298.9 K) における超音波キャビテーション気泡を図11に示す。図6と図11を比較すると飽和液温においてキャビテーション気泡は大きく成長していることがわかる。一方、図7は超音波照射を付加した場合の核沸騰蒸気泡様相を示す。図7を図5と比較すると伝熱面上の蒸気泡が小さくなり、過熱度 ΔT_s も著しく減少している。また、図8および図10は大気圧下の $P_s=101.3$ kPa において超音波照射による蒸気泡様相の変化を示す。ここで、図10を図8と比較すると、図10においては、伝熱面と振動子(写真の上部に写っ

ている直径 20 mm の黒い物体) 間に蒸気泡が多く存在し、 ΔT_s も減少している。

以上のことより、超音波による伝熱促進機構の因子として、減圧下では、振動子の液体加速⁽⁷⁾による液体かく乱効果およびキャビテーション気泡による蒸気泡核供給(小さな ΔT_s で伝熱面に蒸気泡が存在する事実)が考えられ、圧力の上昇とともに、キャビテーション気泡の成長気泡による液体かく乱効果およびキャビテーション気泡による蒸気泡核供給が考えられる。

3.3 蒸留水中にガラスビーズを入れた場合の超音波照射による熱伝達係数増加に及ぼす圧力依存 図12および図13は蒸留水中にガラスビーズ 0.25 g (水

図4 超音波照射による熱伝達係数促進比に及ぼす圧力依存(ガラスビーズを入れない場合)

図5 超音波照射がない場合の蒸気泡様相(ガラスビーズを入れない場合)

図6 飽和液温における超音波気泡様相(ガラスビーズを入れない場合)

図7 超音波照射がある場合の蒸気泡様相(ガラスビーズを入れない場合)

図 8 超音波照射がない場合の
蒸気泡様相 (ガラスビーズ
を入れない場合)

図 9 飽和液温における超音波
気泡様相 (ガラスビーズ
を入れない場合)

図 10 超音波照射がある場合の
蒸気泡様相 (ガラスビーズ
を入れない場合)

図 11 室温における超音波キャビテーション気泡
(ガラスビーズを入れない場合)

量との容積割合は約 120 p. p. m) 入れた場合の例として、 $P_s=8.0 \text{ kPa}$ および 101.3 kPa のとき、熱伝達係数 h に及ぼす振動子入力 $P=140 \text{ W}$ (○印) と $P=0 \text{ W}$ (●印) の結果を示す。図 12, 13 より、 h に及ぼす超音波照射の q 依存は本実験の範囲内では存在しないように思われる。

図 14 は蒸留水中にガラスビーズ 0.25 g 入れた場合、超音波照射による h/h_0 に及ぼす圧力依存を示す。図 14 より、同一の q において、 P_s の減少とともに h/h_0 は大きくなっており、最高約 4 倍の伝熱促進効果を得ている。また、図 4 のガラスビーズを入れない場合と比較すると、各圧力とも h/h_0 はガラスビーズを入れた場合のほうが大きいことがわかる。

3・4 蒸留水中にガラスビーズを入れた場合の超音波照射による蒸気泡様相の変化 図 15 および図 17 は大気圧下の $P_s=101.3 \text{ kPa}$ において、超音波照射による蒸気泡様相の変化を示す。なお、図 16 は同圧力で、 $q=0 \text{ W/m}^2$ のとき、飽和液温において、 $P=140 \text{ W}$ の

図 12 超音波照射による熱伝達係数の変化
(ガラスビーズを入れた場合)

キャビテーション気泡の成長気泡を示す。ここで、図 17 を図 15 と比較すると、図 17 において、伝熱面近傍に蒸気泡が多く存在し、 ΔT_s も減少している。以上のことより、超音波による伝熱促進機構の因子は 3・2 節で述べたのと同様と考えられる。

ところで、蒸留水中にガラスビーズを入れない場合の図 9 と、入れた場合の図 16 を比較すると、後者のほうが振動子先端から伝熱面方向に密なる気泡分布を有している。このことより、伝熱方向にキャビテーション気泡速度が大きくなっていることが推察され、その

図 13 超音波照射による熱伝達係数の変化
(ガラスビーズを入れた場合)

図 14 超音波照射による熱伝達係数促進比に及ぼす
圧力依存 (ガラスビーズを入れた場合)

図 15 超音波照射がない場合の
蒸気泡様相 (ガラスビーズ
を入れた場合)

図 16 飽和液温における超音波
気泡様相 (ガラスビーズ
を入れた場合)

図 17 超音波照射がある場合の
蒸気泡様相 (ガラスビーズ
を入れた場合)

結果, その気泡による液体かく乱効果が著しくなると考察される。そこで, 図 14 の h/h_0 が図 4 の h/h_0 より大きくなる原因の一つと考える。

4. ま と め

超音波照射による飽和ブール核沸騰熱伝達促進に関する実験的研究を行った結果, 本実験の範囲内では, 次のような知見を得た。

- (1) 熱伝達係数促進比は各圧力とも熱流束の増加とともに減少する。
- (2) 熱伝達係数促進比は圧力の減少とともに増加

する。

- (3) 熱伝達係数促進比は蒸留水中にガラスビーズを入れることにより増加し, 最高約 4 倍の伝熱促進効果を得た。

- (4) 超音波照射による伝熱促進機構の因子として, 振動子の液体加速による液体かく乱効果, キャビテーション気泡の成長気泡による液体かく乱効果およびキャビテーション気泡の蒸気泡核供給などが考えられる。

終わりに, 本研究をご討論下さり, 有益なご助言を賜りました京都大学教授 岐美格先生 (現松江工専校

長)に厚く御礼申し上げます。また、本研究にご協力下さった九産大工学部伝熱研卒研究生および畑島正嗣副手に謝意を表す。

文 献

- (1) Wong, S. W. and Chon, W. Y., *AIChE J.*, **15**-2 (1969), 281.
 - (2) Hoshino, T. and Yukawa, H., *J. Chem. Jpn.*, **12**-5 (1979), 347.
 - (3) Bergles, A. E. and Newell, P. H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **8** (1965), 1273.
 - (4) Kam, W. Li. and Jerald, D. P., *Heat Transf.*, (1970), B1-5.
 - (5) Schmidt, F. W., ほか2名, *J. Heat Transf.*, **89** (1967), 289.
 - (6) 飯田・筒井, 機論, **55**-509, ABC (1989), 194.
 - (7) 高山・ほか3名, 東北大速研報告, **52**-438 (1984), 21.
-