円管内での過熱蒸気と空気の混合気体の下降流に対する凝縮熱伝達

Condensation Heat Transfer for Downward Flows of Superheated Steam-Air Mixture in a Circular Pipe

村瀬 道雄[1]，歌野原 陽一[1]，合田 頼人[2]，細川 茂雄[2]，冨山 明男[2]
[1]原子力安全システム研究所，[2]神戸大学，*現：関西大学

直径 49.5 mm の鉛直伝熱管内を下降する過熱蒸気と空気の混合気体における温度分布を測定して熱流束と熱伝達率を評価し、過熱蒸気でも飽和蒸気に対する凝縮熱伝達率の相関式を適用できることを確認した。

キーワード：鉛直管，蒸気・空気混合気体，過熱蒸気，凝縮伝熱，熱伝達率

1. 緒言　これまでに、直径 49.5 mm の鉛直伝熱管内を下降する飽和蒸気と空気の混合気体の半径方向温度分布を測定して熱流束の実験式を導出した[1]。前報[2]では、混合気体の温度分布と熱流束から凝縮熱伝達率を求め、Liao and Vierow [3]による拡散層モデルに基づく相関式と比較し、計算値と測定値のよい一致を得た。本報では、過熱蒸気と空気の混合気体における温度分布を測定して熱流束と熱伝達率を評価した。

2. 評価の方法と結果　実験の入口条件は、圧力が約 0.125 MPa、蒸気流量 $W_{s,in}$ = 0.98～4.47 g/s、空気流量 W_a = 3.0～4.5 g/s、空気質量流量比 $x_{a,in}$ = 0.50～0.75、混合気体レイノルズ数 $Re_{g,in}$ = 4000～12000 である。飽和蒸気とは異なり、過熱蒸気では熱流束 q と熱伝達率 h の関係を次式で与えた。

$$q = h_t\,(T_b - T_w) = h_c\,(T_s - T_f) + h_{conv}\,(T_b - T_f) = h_f\,(T_f - T_w) \qquad (1)$$

h_t は熱通過率、h_c は凝縮熱伝達率、h_{conv} は対流熱伝達率、h_f は液膜熱伝達率、T_b はバルク温度（中心温度 $T_{g,c}$ を使用）、T_f は液膜表面温度、T_w は壁面温度、T_s は流路断面での蒸気分圧に対する飽和温度である。Nusselt の層流モデルで液膜厚さを計算して h_f と T_f を求めた。H_{conv} は Colburn の式を用いて計算した。Liao and Vierow [3]による拡散層モデルに基づく相関式を用いた h_c の計算でも過熱のバルク温度 T_b ではなく飽和の T_s を使用する（飽和温度から凝縮が生じる）。本実験での測定範囲は境界層の発達領域であるため、次式[4]を用いて h_c のシャウッド数 Sh を補正した。　$Sh_z/Sh_\infty = Nu_z/Nu_\infty = 1+C/(z/d)$, $C = 0.8\,\{1+70000/Re_g^{3/2}\}$　(2)

無次元温度分布は、バルク側では過熱蒸気と飽和蒸気で顕著な相違はなく、過熱蒸気は顕熱が小さいため凝縮面側では飽和蒸気より急激に温度低下した。Liao and Vierow [3]による計算値 $h_{c,cal}$ と測定値 $h_{c,exp}$ の比較を図 1 に示す。式(1)の $h_c\,(T_s - T_f)$は近似的な取り扱いであるが、計算値 $h_{c,cal}$ と測定値 $h_{c,exp}$ がよく一致し、飽和蒸気に対する従来の相関式を過熱蒸気に適用できることを確認した。

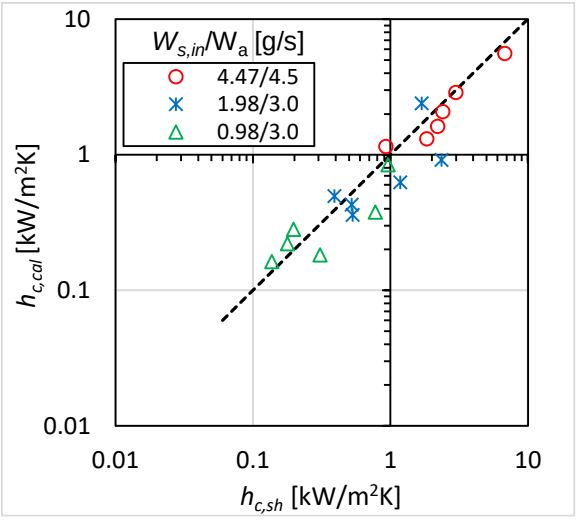

図 1　凝縮熱伝達率の計算値と測定値の比較

3. 結論　拡散層モデルに基づく飽和蒸気に対する凝縮熱伝達率の相関式を過熱蒸気に適用できることを確認した。

参考文献

[1] M. Murase, et al., 混相流, **33**(4), pp. 405-416, 2019.
[2] 村瀬道雄ほか, 原子力学会 2020 春の年会, 2G06, 2020.
[3] Y. Liao and K. Vierow, J. Heat Transfer, **129**, pp. 988-994, 2007.
[4] H.C. Reynolds, et al., J. Basic Eng., **91**(1), 87-94, 1969.

* Michio Murase[1], Yoichi Utanohara[1], Raito Goda[2], Shigeo Hosokawa[2*], Akio Tomiyama[2]
[1]Institute of Nuclear Safety System, Inc., [2]Kobe University, *Present affiliation: Kansai University