

論文の内容の要旨

論文題目 電場による凝縮熱伝達の促進に関する研究

氏名 儲 仁 才

水平ローフィン付凝縮管は、管外表面で起こる膜状凝縮熱伝達の促進に対して極めて有効である。例えば、R113の場合には水平平滑管に対して7～8倍程度の凝縮熱伝達の促進効果を実現されている。しかし、フィンを高密度に設置した場合、あるいは凝縮液表面張力が大きい場合に、凝縮液がフィン間の溝に充満・滞留する現象が起こり、促進効果が著しく低下する問題が発生する。例えば、フィン付管における水蒸気の凝縮熱伝達に対しては最大2～3倍程度の促進効果しか得られていない。これまで、この問題に対処するため、凝縮管底部下方に多孔質排液板を設けるなどの方法が提案されているが、構造自体が複雑で比較的寸法の大きな排液板（縦長さ20mm程度）を要するなどの問題点があるため、実用化には至っていない。

そこで、本研究では、構造上もシンプルで熱交換器のコンパクト化に障害とはならず、高フィン密度、高表面張力流体に対しても水平フィン付管の本来の高性能を維持する方法を見い出すことを研究目的、熱伝達促進効果の低下が顕著な

0.5mmフィン間隔のローフィン付管における水蒸気の凝縮熱伝達を研究対象とし、1mm直径の細い線電極を凝縮管底部の下方近くに管軸と平行に配置して、そのEHD（電気流体力学的）効果を利用することにより促進効果の低下を防ぐ方法について、実験および解析により検討を加えた。実験では直流電源を用いて電場を印加した。

裸線電極を用いた凝縮熱伝達促進の実験研究では、印加電圧（1400V以下）、電極間距離（1～3mm）、熱流束（0.45MW/m²以下）に関する本実験の範囲内で、電場を印加しない水平ローフィン付凝縮管に比べて2.4倍、水平平滑凝縮管に比べて5倍以上の凝縮熱伝達促進を実験的に達成した。特に電極間距離が1mmの場合にこれらの値が得られており、多孔質排液板に比べて、本方法は凝縮器のコンパクトに有効であることを示した。因みに、本方法では、印加電場により電流が流れるために電力の消耗が起こるが、裸線電極でも消費電力は、凝縮熱伝達の促進による伝熱量増加分の3.5～4.0%程度である。

上記の消費電力をさらに低減するために、裸線電極のかわりに頂部と底部が絶縁被覆された部分絶縁被覆線電極を用いることを提案し、これを用いることにより、同一の印加電圧、電極間距離、および熱流束において、裸線電極と同程度以上の熱伝達促進率が得られること、その際の消費電力は裸線電極に比べて半分程度に低減できることを実験的に示した。ちなみに、部分絶縁被覆線電極では、電場を印加しない水平ローフィン付凝縮管に比べて3.2倍、水平平滑凝縮管に比べて7倍程度の凝縮熱伝達促進を実験的に達成している。

熱伝達促進効果の印加電圧、電極間距離、および熱流束に対する依存性については、裸線電極および部分絶縁被覆線電極の双方の場合とも、印加電場による熱伝達促進は、印加電圧の増大、電極間距離の減少、熱流束の増大とともに向上することを実験的に示した。また、裸線電極の場合には、印加電場による凝縮熱伝達促進率がステップ状に急増する臨界電圧あるいは臨界熱流束が存在し、これら臨界値を境にして促進効果に関する二領域が存在すること、部分絶縁被覆線電極

の場合には、この二領域の間に中間領域が存在し、三領域となることを示した。凝縮液流下様相の観察あるいは電極間を流れる電流値変動などをもとにして、上記の領域の定性的機構を示した。すなわち、裸線電極の場合の二領域を区切る臨界電圧あるいは臨界熱流束は、凝縮管底部からの凝縮液流下様相が液膜状から液柱状へと遷移することにより発生する。部分絶縁被覆線電極の場合に介在する中間領域は、凝縮液流下様相が液膜状に保ちながら薄液膜化することにより発生し、印加電圧あるいは熱流束がある値以上に至ると、裸線電極と同様に液膜状から液柱状への遷移が発生する。顕著な熱伝達促進効果が現れた印加電圧領域は、いずれの液柱領域と部分絶縁被覆線電極の場合での薄液膜領域である。

凝縮液のフィン溝内における充満・滞留の度合いを評価するには充満角度(管頂部から充満開始点までの角度)を用いるが、電場下での充満角度が動的特性をもつため今まで提案された光反射法およびSighting Scope法などの静的充満角度測定法が適用できなくなった。ここで、高速ビデオにより撮影した画像をもとにしてフィン溝内映像輝度の差から画像処理により凝縮液の充満角度に関する動的測定方法を新たに提案するとともに、この方法を用いて充満角度を測定し、充満角度と熱伝達促進効果との印加電圧などに対する依存性は一対一に対応する結果から、印加電場による熱伝達促進は充満角度の増大に起因することを確認した。

以上の測定・観察結果をもとに、基本的には「凝縮管底部から流下する凝縮液の圧力が印加電場による電気力により低下することに起因して充満角度が増大する」との考えに基づき、印加電場による充満角度の増大に関する解析モデルを提案した。部分絶縁被覆線電極において介在する中間領域(薄液膜領域)に関する解析モデル(薄液膜モデル)では、凝縮液流下様相は薄液膜状とし、電気力による薄液膜内の圧力低下のみを考慮した。一方、流下様相が液膜状から液柱状へと変化した場合に関する解析モデル(液柱移動モデル)では、印加電場による界面不安定に関する線形安定理論により、液柱直径および液柱ピッチを定め、さらに

液柱移動に関する周期性を加味した。以上の解析モデルによる充満角度の予測値は、測定結果と良好な一致を示した。なお、充満角度に関する本解析モデルと既知の水平ローフィン付凝縮管の熱伝達モデルを組み合わせるにより、裸線電極における臨界電圧（あるいは臨界熱流束）以上、すなわち液柱状へ遷移した後の凝縮熱伝達率を予測し、良好な一致を得た。

本論文は5章により構成されている。第1章の序論では、フィン付管およびEHD効果による凝縮熱伝達促進法に関する従来の実験および理論研究を総括して述べるにより、研究背景と従来の研究における問題点を明らかにして本研究の目的を確立した。第5章は本研究のまとめであり、上記の本研究の内容については、第2章～第4章にわたって記述した。

第2章では、裸線電極による水平管外凝縮熱伝達の促進に関する実験研究について、特に熱伝達促進効果の印加電圧、電極間距離、および熱流束に対する依存性、電極間液膜の流下様相の観察、動的充満角度の測定法の開発および消費電力の評価などを詳細にまとめた。

第3章では、部分絶縁被覆線電極を用いた場合での熱伝達促進効果の印加電圧、電極間距離、および熱流束に対する依存性、熱伝達促進効果、電極間を流れる電流の特性、特に消費電力の低減効果に関しては詳細に述べた上に、これらに関する裸線電極の場合と部分絶縁被覆線電極の場合との相違を比較した。さらに充満角度の測定値と既知のフィン付管における熱伝達率の予測方法を用いた電場下での凝縮熱伝達率の予測などについて詳しく記述した。

第4章では、液膜の液柱への遷移機構に関する実験および解析、液柱状へ遷移した後の熱伝達促進効果の定量化、部分絶縁被覆線電極において薄液膜化された後の充満角度に関する定式化などについての検討およびその結果を詳細にまとめた。