

フロン系冷媒を用いた水平微細溝付管外の凝縮熱伝達率の予測

著者	松野 友暢
学位名	博士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
学位授与番号	12614 博甲第567号
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00002007/

博士学位論文内容要旨
Abstract

専攻 Major	応用環境システム学専攻	氏名 Name	松野友暢
論文題目 Title	フロン系冷媒を用いた水平微細溝付管外の凝縮熱伝達率の予測		

モントリオール議定書のキガリ改正により、冷凍空調業界では地球温暖化への対策として、低 GWP 冷媒やノンフロン冷媒への転換が進められている。このような中、ターボ冷凍機でも地球温暖化係数の小さい HFO 系冷媒への代替が進められつつある。また、機器が大型であるため冷媒充填量が非常に多く、環境面と安全面から熱交換器の一層の小型化が求められている。この需要に対して、ターボ冷凍機の凝縮器には外面形状を工夫した伝熱促進管が使われており、これまでも機器の小型高性能化に寄与してきた。その形状は 3 次元微細形状が採用されている。しかし、実際に機器に組み込む際は、冷媒物性の影響や多段で使用した場合のインテンデーション影響などを考慮する必要がある。

矩形の 2 次元ローフィン管については過去多数の研究がなされている。しかし、伝熱促進管の 3 次元微細形状については、研究はされているものの形状を体系的に検証した例はなく、冷媒物性が及ぼす伝熱性能・液膜流動様相への影響についても十分に明らかになっていない。また、近年使用されている HFO 系冷媒の伝熱特性については、インテンデーションの影響を考慮した研究事例は乏しい。

本研究では、外径 19mm および 16mm 平滑管と種々の外面フィン形状を持つ外面加工管を対象とし、HFC 系冷媒 R134a および R245fa、また HFO 系冷媒 R1234ze(E) および R1234yf の水平管外凝縮熱伝達実験を行った。その結果、単管および管群状態を模擬した場合の熱伝達特性を明らかにするとともに、フィン形状と冷媒物性が伝熱性能へ及ぼす影響を実験的に明らかにし、3 次元微細溝形状の水平管外凝縮熱伝達率の予測式を提案した。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では、フロン系の純冷媒を対象とした水平平滑管、ローフィン管、3 次元微細溝付の管外凝縮に関する従来の研究を概説し、研究の背景を明確にする。また、本論文の意義および目的を示した。

第 2 章では、本研究で用いた水平平滑管、ローフィン管、3 次元微細溝付管を用いた凝縮熱伝達実験装置および測定・実験方法の詳細を示した。

第 3 章では、総括熱伝達率と管内熱伝達率を用いた場合、または管壁温度を用いた場合の管外熱伝達率算出など、データ整理法の詳細について示した。

第 4 章では、R134a および R245fa を用いた平滑管の管外凝縮熱伝達率の実験結果を示した。(1) 単管での凝縮熱伝達率は、いずれの場合でも Nusselt の式に対して高い値を示した。Nusselt の式は、液膜の乱れや液膜内の対流の影響を考慮していないため、実験値は高い値を示したと考えられる。(2) インテンデーション実験では、膜レイノルズ数の増加に伴い凝縮熱伝達率は低下するが、膜レイノルズ数 300~500 で液膜の対流が促進されると凝縮熱伝達率は増加に転じた。

第 5 章では、R134a および R245fa を用いたフィンピッチ 26 および 34 山/インチのローフィン管の管外凝縮熱伝達率の実験結果を示した。(1) 冷媒の相違、フィンピッチ、フィン高さによらず、凝縮熱伝達率は Nusselt の式と同じ傾向を示した。(2) 単管での凝縮熱伝達率は、伝熱面積の向上と凝縮液の表面張力によりフィン溝底部へ液膜が引き込まれ、フィン側面の液膜が薄くなり液膜抵抗が小さくなるため平滑管に対して面積拡大率以上に高い値を示した。(3) インテンデーション実験では、膜レイノルズ数 Ref の増加に伴い、平滑管同様に液膜厚さが増大し凝縮熱伝達率が低下するものの、凝縮液膜の対流拡散が促進されるため、凝縮熱伝達率が低下しづらい。しかし、フィン高さが低いと対流拡散の影響よりも、液膜増加による熱抵抗増加の影響を受けやすくなる。

第 6 章では、R134a および R245fa を用いたフィンピッチ 34 山/インチの 3 次元微細溝付管の管外凝

縮熱伝達率の実験結果を示した。(1) いずれの試験伝熱管も、冷媒の相違およびフィン形状によらず Nusselt の式とおおむね同じ傾向を示すが、凝縮量の増加に伴い分断溝部を凝縮液が覆うため、凝縮面過冷度が大きい領域では伝熱促進率が低下する。(2) 単管での凝縮熱伝達率は、ローフィン管よりも伝熱促進効果が高いことを示した。(3) フィン先端の周方向分断形状は、冷媒の相違およびイナnderションの影響によらず、凝縮液の表面張力により溝部への引き込みが大きくなるため溝角度が小さい方が凝縮熱伝達率は高い値を示す。(4) フィン先端の周方向分断形状は、分断部のフィン溝間の隙間が狭くなることで、膜レイノルズ数増加に伴う対流拡散の影響を阻害することと、液捌け性が悪くなり凝縮液の充満量が増えて熱抵抗が増加することにより、凝縮熱伝達率が低下する。(5) 周方向に延びる Y 字溝による伝熱促進効果は、高膜レイノルズ数域でも、フィン先端各部での薄液膜化による伝熱促進効果があるものと考えられる。また、イナnderション影響による凝縮熱伝達率の低下は、周方向分断加工による影響が大きい。

第 7 章では、R134a および R245fa、R1234ze(E)、R1234yf を用いた外径 19mm および 16mm の外面に先端交差分断型フィンをもつフィンピッチ 40 山/インチの 3 次元微細溝付管の管外凝縮熱伝達率の実験結果を示した。(1) 単管での凝縮熱伝達率は、平滑管に対し外径 19mm の場合は 6 から 8 倍程度、外径 16mm の場合は 7 から 14 倍程度高い値を示した。この相違は、フィン高さの違いによるものと考えられる。(2) いずれの管径および冷媒でも、凝縮量が減少するに伴い熱伝達率が増加した。これは、凝縮量が少ない場合は 3 次元微細溝形状によりフィン先端での薄液膜化が促進され液膜熱抵抗が減少する。しかし、凝縮量が増えると 3 次元微細溝が凝縮液で満たされ覆われるため、液膜熱抵抗が増大するためと考えられる。(3) 単管の凝縮熱伝達率は、R134a が最も高く、R245fa と R1234ze(E) が同程度、R1234yf が最も低い値を示した。この要因は、各冷媒の表面張力と密度の比および凝縮液熱伝導率の関係性に一致する。(4) イナnderションの影響を模擬した実験では、いずれの冷媒も膜レイノルズ数 600 以下の範囲では、3 次元構造フィンを有するため管表面での凝縮液の対流を阻害しやすいこと、フィン溝部に凝縮液が充満するため液膜熱抵抗の影響が大きいことから膜レイノルズ数の増加に伴い熱伝達率は低下した。しかし、R134a、R1234ze(E)、R1234yf において膜レイノルズ数 600 から 1200 の範囲では熱伝達率の低下は緩やかとなった。これらのことから、3 次元微細溝付管において膜レイノルズ数 1200 以下では、層流での対流熱伝達が支配的であり、乱流による対流拡散の影響は小さいと考えられる。

第 8 章は、平滑管の管外凝縮熱伝達率について、これまでの実験結果からイナnderションの影響と管外径と管ピッチを考慮した予測式の提案を行った。また、外径 19mm の先端交差分断型の 3 次元微細溝付管の管外凝縮熱伝達率について、平滑管の予測式を元にフィン形状と冷媒物性値、イナnderションの影響を考慮した予測式を提案した。

第 9 章は、本論文の総括を示した。