

4 mm水平細径溝付管内における低GWP冷媒の凝縮熱伝達と圧力損失の予測手法

著者	広瀬 正尚
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	2019
学位授与番号	12614 博甲第534号
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001804/

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	広瀬 正尚
論文題目 Title	4 mm 水平細径溝付管内における低 GWP 冷媒の凝縮熱伝達と圧力損失の予測手法		

冷凍空調機器に使用される冷媒に関する国際的規制は、地球温暖化を防止するパリ協定の影響を受け強化の一途をたどり、モントリオール議定書のキガリ改正によって総量規制が現実化された。そのような状況下で、家庭用空調機をはじめとする様々な冷凍・空調機器では、冷媒充填量削減のため、熱交換器の小型化を図り、その性能を向上させることが求められている。その一つの方策として、熱交換器用伝熱管の細径化が進められており、近年では外径 5 から 4 mm の細径伝熱管が商用化され始めている。従来の HFC 系冷媒および 6 mm 以上の管径を有する溝付管の研究は多数見られるが、実用途上にある外径 4 mm 程度の細径溝付管に関する研究は限定的である。

本研究では、外径 4 mm、等価直径 3.5 mm の細径溝付管を対象とし、溝形状の異なる 3 種類の溝付管と平滑管内の HFC 系冷媒 R32 および地球温暖化係数 (GWP) が小さな HFO 系冷媒 R1234ze(E) の凝縮実験を行った。凝縮熱伝達および圧力損失特性を明らかにするとともに、溝形状が伝熱性能に与える影響を実験的に検証し、これまでに提案されている平滑・溝付管内の凝縮熱伝達および圧力損失に関する予測式の適用性について検討した。その結果、適正な精度で予測できる凝縮熱伝達および圧力損失の式を明確にし、実験データからそれらを予測する手法を確立した。

本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では、純冷媒を対象とした細径平滑・溝付管内の凝縮流における圧力損失と凝縮熱伝達に関する従来研究を概説し、研究の背景を明確にした。また、本論文の意義および目的を示した。

第 2 章では、本研究で用いた細径平滑・溝付管を用いた流動様相、実験装置および測定・実験方法について詳細に示した。

第 3 章では、実験データの整理方法について述べた。

第 4 章では、冷媒 R32 および R1234ze(E) の細径平滑・溝付管内の流動様相の観察結果を述べるとともに、従来の流動様式線図と比較した。その結果、以下のことを明らかにした。(1) 平滑・溝付管ともに、環状流、波状流、スラグ流の 3 種に分類できた。(2) 平滑管は、質量速度 $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上で環状流が観察された。溝付管では、平滑管と異なり、質量速度 $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の条件でも低湿度度域で環状流が観察された。(3) 溝付管の環状流から波状流への遷移は、地下らの式で予測できる。

第 5 章では、R32 および R1234ze(E) の細径平滑・溝付管内の圧力損失の実験結果を述べるとともに、これまでの先行研究で提案された予測式と比較を行った。その結果、以下のことを明らかにした。(1) R32 は R1234ze(E) に比して 30% 程度小さい値を示す。これは R1234ze(E) の蒸気密度が R32 より 40% 程度小さいことに加え、R1234ze(E) の液粘度が R32 に比して 1.6 倍程度大きいことから、R1234ze(E) は管内蒸気速度による摩擦損失が大きいと考えられる。(2) 平滑および溝付管内の圧力損失は、平滑管では地下-小山の式、溝付管の圧力損失は井上らの式でほぼ予測することができる。

第 6 章では、R32 および R1234ze(E) の細径平滑・溝付管内の凝縮熱伝達の実験結果を述べるとともに、溝形状の与える熱促進効果について述べ、さらにこれまでに提案された予測式と比較を行い、その適用性について述べた。その結果、以下のことを明らかにした。(1) 凝縮熱伝達率と流動様相の遷移は密接な相関があり、環状流が観察された領域では、質量速度が増加するのに従い凝縮熱伝達率は増加し、強制対流凝縮の影響が強くみられた。一方で波状流、スラグ流域では、質量速度の違いによる凝縮熱伝達率への影響は小さく、自由対流凝縮の影響が大きい。(2) 平滑管の凝縮熱伝達率は、こ

れまでの予測式で予測することがほぼ可能であるが、溝付管の熱伝達率を精度よく予測することは難しい。

第7章では、細径平滑・溝付管に対して適用できる圧力損失および凝縮熱伝達率の予測式の提案を行った。新たな圧力損失の予測式では、平滑・溝付管を一つの式で相関することができる予測式を提案した。凝縮熱伝達率の予測式は、予測精度を重視し平滑管、溝付管のそれぞれで現象モデルに基づき、流動様相の影響を考慮した予測式を提案した。その結果を以下に示す。(1) 提案した圧力損失の予測式は、平滑・溝付管の圧力損失をほぼ $\pm 30\%$ で予測できる。(2) 平滑管の凝縮熱伝達率の予測式は、ほぼ $\pm 30\%$ で予測できる。(3) 溝付管の凝縮熱伝達率の予測式は、本実験結果をほぼ $\pm 30\%$ で予測し、管径の異なる他の研究者の実験結果と傾向は一致している。

第8章は、非共沸混合冷媒 R32/R1234ze(E)の凝縮特性について、純冷媒 R32 および R1234ze(E)と比較し、非共沸性について検討した。また、混合組成の伝熱性能への影響を実験的に検証し、温度グライドの熱伝達率への影響を明らかにした。その結果を以下に示す。(1) 混合冷媒の圧力損失は、物性値の影響により、R32 より増大する。(2) 細径平滑・溝付管の混合冷媒の凝縮熱伝達率は、質量速度の増加にともない増加し、温度グライドが大きくなると純冷媒に比して低下する。

第9章は、本論文の総括である。