

学位論文の要旨

氏名

MOHD HAZWAN BIN YUSOF

学位論文題目

A Study on Energy Separation Mechanism in Ranque-Hilsch Vortex Tube
(ボルテックスチューブのエネルギー分離機構に関する研究)

本論文は、ボルテックスチューブ (Vortex Tube ; 以下, VT) のエネルギー分離機構の解明のための実験と数値モデル解析についてまとめたものである。

第1章では、VTの歴史、長所、短所、特徴および適用例などについて述べた。次に、VTに関する従来の研究について述べた。具体的には、VTに関する実験的、理論的な研究と数値シミュレーションを用いた研究について、概要と未解決の問題点を述べた。本章の最後では、本研究の目的及び本論文の構成について述べた。

第2章では、本研究で用いた実験装置と実験手順について述べた。すなわち、本研究で使用した実験設備と実験に用いたVTの構造の詳細について説明した。その後、コールド出口の中心軸上のピトー全圧の測定に用いた極細のピトー全圧プローブ、及びコールド出口の旋回流れを可視化するために用いた2つの可視化手法について説明した。

第3章では、本研究で用いた3種類の全温度プローブについて述べた。まず、高エンタルピー流れの全温度測定に用いられる従来全温度プローブについて説明した後、本研究で用いた3種類の全温度プローブの構造と寸法について説明した。貯気温度が大気温度の空気を先細ノズルから噴出させ、その中にプローブを挿入して全温度の測定精度を確認した。その結果、3つの全温度プローブの測定精度は $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 以内であることを示した。

第4章では、コールド出口のピトー全圧と全温度の測定結果、コールド流れ中心軸上の可視化結果、VTの性能評価するための冷風・温風の平均温度測定、及びコールド側の

流動モデルについて述べた。コールド出口管から3mm下流の中心軸上でのピトー全圧の測定結果より、入口圧力0.2~0.6MPaの範囲においてコールド率が約0.6以下のとき、ピトー全圧は大気圧を下回ることを示した。加えて、冷風出口中心の全温度と流れの可視化から、コールド出口には逆流領域が存在し、逆流領域内の温度は周囲の温度よりも低いことを示した。また、冷風・温風の平均温度より、VTの冷却能力と熱損失について述べた。さらに、コールド出口管内の流動モデルについて述べた。本章の最後では、VT内の熱エネルギー分離機構に与えるコールド率と入口圧力の影響について、それぞれ考察した。

第5章では、数理モデル解析を用いて、圧縮性乱流渦内のエネルギー分離の原理について考察した。まず、従来の圧縮性乱流渦の数理モデルとその問題点について述べた。次に、本研究で用いる数理モデルの基礎式と、圧縮性乱流渦内の速度、温度、密度の式の導出過程を示した。次に、その数理モデルの問題点と改善方法について述べた。最後に、改善された圧縮性乱流渦の数理モデルを用いて、流線に沿う単位質量あたりの全エネルギーの分布を示した。さらに、全エネルギーが渦の中心軸に向かって増加した後に中心軸近傍で減少する理由を、流線に沿う全エネルギー変化の式から考察した。その結果、全エネルギーの増加には粘性散逸による熱量の発生が主に寄与し、その後の全エネルギーの減少には摩擦仕事に主に寄与していることを示した。

第6章では、本論文の結論を総括した。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

A Study on Energy Separation Mechanism in Ranque-Hilsch Vortex Tube

Name: Mohd Hazwan bin Yusof

This thesis describes the experimental and model analysis on the energy separation mechanism (ESM) in a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube. This thesis comprises 5 chapters.

Chapter 1 introduces the basic idea about a VT; explaining the history, the types, the example of usage, and the advantages/disadvantages of a VT. A proposed flow pattern inside a counter flow VT is also explained. In the literature section, the researches on the geometrical optimization of the VT, and the flow pattern inside a VT are included with a discussion on the inconsistencies about the results obtained by different researchers. Then, the objectives of this thesis are also expressed in this chapter.

Chapter 2 describes the experimental apparatus and procedures of the total temperature/pressure measurement methods, and the flow visualization techniques. The specifications of the equipment and measurement devices are shown in this chapter. There are two simple flow visualization techniques. Both techniques use needle and oil paint droplet. The first technique uses an oil paint droplet, on a 0.75mm-diameter needle. The oil paint droplet on the needle is positioned along the centerline of the cold flow. The movement of the oil paint droplet represents the flow direction of the cold flow. Another technique uses a 0.70mm-diameter needle with 10 small holes which can exudate colored oil (exudation needle). The exudation needle is inserted into the cold flow along the centerline. Then the colored oil is injected to the exudation needle little by little and exuded from the small holes. The flow direction of the colored oil on the exudation needle represents the flow direction of the cold flow.

Chapter 3 explains the development of total temperature probe with the objective and structure of the probe is explained. Those probes are named as Type 1, 2, and 3. An evaluation experiment is conducted using the Type 1, 2, and 3 to determine the effects of probe angle along the centerline of a sonic jet nozzle on the measurement accuracy. Results show that the largest measurement error for Type 1, 2, and 3 are -1.3°C , -1.1°C , and -0.7°C , respectively. From these results, the effect of the angle of the thermocouple on the total temperature measurement is negligibly small.

Chapter 4 reports the results of total temperature/pressure measurements and flow visualization at the cold exit. The experiments of the effects of the cold fraction on the measurement were carried out with the Type 3 total temperature probes and Pitot pressure probe. From the results, a negative and positive gauge pressure regions are measured. It implies the possibility of a direct/reversed flow at the cold exit. To clarify the flow direction, two kinds of flow visualization are conducted. The flow direction of the cold flow is determined by the movement of the oily paint droplet. From the results, a reversed flow is observed around the center of cold exit at a smaller cold fraction. The length of reversed flow increases as the cold fraction decreases, which implies the decrease in the pressure at the core of the vortex chamber. A

lower pressure in the vortex chamber means a lower static/total temperatures at the core of vortex chamber and a higher static/total temperatures at the outer region of the vortex in the vortex chamber. This is the effect of cold fraction on the EMS at an arbitrary inlet pressure. When the inlet pressure increases at an arbitrary cold fraction, the tangential velocity increases, which results in a lower static/total temperatures at the core of the vortex chamber and a higher static/total temperatures at the outer region of the vortex in the vortex chamber.

Chapter 5 describes a mathematical model analysis of isolated unconfined compressible vortex flow with a review of some literatures. The basic equations, the laminar vortex solutions, turbulent vortex solutions, and problems with VAB model are explained. The improvement of the VAB model is conducted by replacing the laminar Prandtl number with a laminar plus turbulent Prandtl numbers. The results show that the total temperature is roughly independent of the summation of laminar and turbulent Prandtl numbers. The EMS in a turbulent compressible vortex is discussed and proposed, by examining the VAB model in detail. The results show that a hotter gas in the peripheral region of the vortex is mainly caused by heat generated by viscous dissipation, and colder gas in the vortex core is mainly generated by viscous shear work done on the surface of the fluid element to the surrounding gas.

Chapter 6 summarizes the conclusions of this study based on the implementation of objectives.