Thesis Title Heat Transfer Characteristics of Radially Rotating Heat Pipe at Normal Operating Condition

Author Mr. Narong Waowaew

Degree Doctor of philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Prof. Dr.	Pradit Terdtoon	Chairperson
Prof. Dr.	Saburo Maezawa	Member
Asst. Prof. Dr.	Wiwat Klongpanich	Member
Asst. Prof. Dr.	Patrapon Kamonpet	Member
Lect. Dr.	Nat Vorayos	Member
Dr.	Piyanun Charoensawan	Member

ABSTRACT

This thesis aims to study the heat transfer characteristics of a radially rotating heat pipe (RRHP) by the following procedures; firstly, a quantitative investigation of heat transfer characteristics, secondly, the visualization of the inside flow phenomena, thirdly, the establishment of a mathematical model, and finally, the application of RRHP to reduce disk brake temperature.

The most important part is systematic investigation of the heat transfer characteristics. This was accomplished by taking into account the aspect ratio, inclination angle, inner diameter, rotational acceleration and working fluid. It was found that the heat flux of a RRHP had an inverse relationship with aspect ratio. It can be concluded from this result that when the inclination angle increased from 0 to 90 degree, the heat flux slightly decreased, but slightly increased at the inclination angle of 90 degree. The RRHP with lower inner diameter could transfer higher heat flux than that with higher inner diameter. The higher liquid density of working fluid, the lower the heat flux that the RRHP could transfer. All of the experimental results of the heat flux of a RRHP at the vertical and the horizontal position could be correlated as follows, which is proposed as the general correlation to predict the heat transfer of the RRHP.

$$q^{*}_{90} = 6\times10^{7}\left(\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65} Fr^{0.5}Bo^{-0.85}Ek^{0.1}Ja^{-0.15}Pr_{l}^{-0.35}\left(\frac{Cp_v}{Cp_l}\right)^{4.6}\left(1-\left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)\right)^{0.19}\right)^{0.57}$$

and

$$q^{*}_{0} = 5\times10^{7}\left[\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65} Fr^{0.55}Bo^{-0.88}Ek^{0.1}Ja^{-0.1}Pr_{l}^{-0.38}\left(\frac{Cp_v}{Cp_l}\right)^{4.9}\left(1-\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.21}\right]^{0.51}$$

The standard deviations from these correlations were ±13.1% and ±10.8% respectively.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

To visualize the inside flow phenomena, the effects of aspect ratio, inclination angle and rotational acceleration were observed using a glass evaporator section of a RRHP. It was found that as the aspect ratio increased from 5 to 20, the internal flow patterns of bubble flow and annular flow, which was the flow pattern inneed, changed to bubble flow, churn flow and annular flow. The heat flux then changed drastically. Inclination angle affected the internal flow pattern such that, when the inclination angle decreased from 90 – 50 deg., the flow pattern at the upper part of evaporator section remained as annular flow while that of the lower section involved bubble flow with the size of vapor bubbles decreased. However, when the angle decreased further from 50 – 0 deg., the flow pattern at the lower part changed to annular flow. The effect of the rotational acceleration on the internal flow patterns is; although at all acceleration the internal flow patterns were bubble flow and annular flow, but at high rotational acceleration the condensate quickly returned to evaporator section and swept the liquid film at all time.

From the quantitative and visualization study, a mathematical model can be established. The theory of Nusselt-type thin film condensation, internal friction flow and basic governing equations were incorporated in the model to evaluate the heat flux of an RRHP. The computer program used was MATLAB® program. From the mathematical model, the heat fluxes of a RRHP at various conditions was calculated and compared to those of the experiment. It was found that the mathematical model results were in good agreement with those of quantitative experiments, especially when using R123 as working fluid. The standard deviation of the mathematical model predictions was ± 27.6%. Errors occurred due to the temperature difference of vapor temperature and condenser temperature of the RRHP in the experiment, which was rather high. Also, the condenser temperature was measured only at one point on the circumferential length and in practice, the film thickness and the film flow return to the evaporator were not equal, unsteady and non-linear.

Using the results of the quantitative, qualitative and mathematical model study, we can design the RRHP for high heat flux by selection of the parameters as follows: low aspect ratio, low inner diameter, high rotational speed and vertical position.

Finally, the correlation at vertical position found from quantitative study was utilized in the design of RRHP to reduce disk brake temperature. The 15 tubes of an RRHP with inner diameter 9.5 mm and length of 100 mm were installed on the disk brake, employing ethanol as the working fluid. From calculation of the correlation, at a braking torque of 75 N-m, braking period was 10 seconds per times and the experiment time was 6 minutes. The RRHP could transfer heat of 392.93 Watts with an efficiency of 0.54, which was lower than that of the calculation. Possible reasons for this include that the condenser length of each tube was not equal, since it depends on the empty area of the disk brake. However, a correlation the condenser length of each tube was equal and as same as the evaporator length. Overall, the RRHP was shown to give good performance in reducing temperature of a car disk brake.

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่สภาวะการทำงานปกติ

ผู้เขียน นายณรงค์ วาวแวว

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศ. ดร. ประดิษฐ์	เทอดทูล	ประธานกรรมการ
Prof. Dr. Saburo	Maezawa	กรรมการ
ผศ. ดร. วิวัฒน์	คล่องพานิช	กรรมการ
ผศ. ดร. ภัทราพร	กมลเพ็ชร	กรรมการ
อ. ดร. ณัฐ	วรยศ	กรรมการ
ดร. ปิยะนันท์	เจริญสวรรค์	กรรมการ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี (RRHP) โดยแยกการศึกษาเป็นหัวข้อดังนี้ การศึกษาเชิงปริมาณถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน การศึกษาเชิงทัศน์ของปรากฏการณ์การไหลภายใน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการนำไปประยุกต์ใช้งานในการลดอุณหภูมิของดิสเบรกรถยนต์

ส่วนที่สำคัญที่สุดคือการศึกษาแบบเป็นระบบเชิงปริมาณของคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี โดยศึกษาถึงผลของ อัตราส่วนสนทัด มุมเอียง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความเร่งเนื่องจากการหมุน และสารทำงาน ที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน จากผลการทดสอบสรุปผลได้ดังนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ผิวให้ความร้อน (q) ของ RRHP จะแปรผกผันกับอัตราส่วนสนทัด เมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 90 องศา ค่าของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ผิวให้ความร้อนลดลงอย่างช้าๆ ถึงค่าต่ำสุด และเพิ่มขึ้นอย่างช้าจนถึงมุม 90 องศา RRHP ที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในต่ำๆ สามารถถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าที่ RRHP ที่มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงๆ สารทำงานที่มีค่าความหนาแน่น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ของของเหลวสูง จะสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ต่ำ ได้นำค่าการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งแนวดิ่งและแนวระดับของผลการทดลองทั้งหมดมาหาสมการสหสัมพันธ์ซึ่งสามารถที่จะใช้ทำนายค่า q ของ RRHP ได้ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน $\pm$ 13.1 และ $\pm$ 10.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

$$q_{90}^{*} = 6x10^{7}\left(\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65} Fr^{0.5}Bo^{-0.85}Ek^{0.1}Ja^{-0.15}Pr_{l}^{-0.35}\left(\frac{Cp_{v}}{Cp_{l}}\right)^{4.6}\left(1-\left(\frac{\rho_{v}}{\rho_{l}}\right)\right)^{0.19}\right)^{0.57}$$

และ

$$q_{0}^{*} = 5x10^{7}\left[\left(\frac{Le}{d}\right)^{-0.65} Fr^{0.55}Bo^{-0.88}Ek^{0.1}Ja^{-0.1}Pr_{l}^{-0.38}\left(\frac{Cp_{v}}{Cp_{l}}\right)^{4.9}\left(1-\frac{\rho_{v}}{\rho_{l}}\right)^{0.21}\right]^{0.51}$$

การศึกษาในส่วนต่อมาคือการศึกษาเชิงทัศน์ของปรากฏการณ์การไหลภายใน ซึ่งมุ่งศึกษาถึงผลของอัตราส่วนสนทัด มุมเอียง และความเร่งเนื่องจากการหมุน โดยใช้ RRHP มีส่วนทำระเหยเป็นท่อแก้ว จากผลการทดลอง พบว่าเมื่ออัตราส่วนสนทัดเพิ่มขึ้นเป็น 5 ถึง 20 รูปแบบการไหลภายในเปลี่ยนจาก Bubble flow และ Annular flow ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่ต้องการไปเป็นแบบ Bubble flow , Churn flow และ Annular flow เมื่อมุมเอียงลดลงจาก 90 – 50 องศา รูปแบบการไหลที่ส่วนบนจะเป็นแบบ Annular flow ในขณะที่ในส่วนล่างจะเป็น Bubble flow โดยขนาดของฟองไอลดลง แต่เมื่อมุมเอียงลดลงจาก 50 – 0 องศา รูปแบบการไหลที่ส่วนล่างจะเปลี่ยนไปเป็น Annular flow ความเร่งเนื่องจากการหมุนมีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของ RRHP คือถึงแม้ที่ทุกๆ ความเร่ง รูปแบบการไหลภายในจะเป็นแบบ Bubble flow และ Annular flow แต่ที่ความเร่งสูงๆ ฟิล์มของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นไหลกลับมายังส่วนทำระเหยอย่างรวดเร็วและมีการแกว่งไปมาตลอดเวลา ทำให้ค่า q เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากผลการทดลองเชิงปริมาณและเชิงทัศน์ข้างต้นสามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอ้างอิงทฤษฎีการกลั่นตัวของฟิล์มของเหลวแบบแผ่นบางของ Nusselt ความเสียดทานการไหลในท่อและสมการควบคุมพื้นฐานและนำมาประยุกต์ใช้กับการทำนายค่า q ของ RRHP โดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากภาษาแม็ทแล็บ (MATLAB®) และนำแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดสอบพบว่าค่าจากแบบจำลองจะมีความเข้ากันได้ดีกับค่าจากการทดลองเชิงปริมาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อใช้ R 123 เป็นสารทำงาน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตราฐานเท่ากับ $\pm$ 27.6 เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดของแบบจำลองอาจเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิไอและอุณหภูมิผิวของส่วนควบแน่น ที่ได้จากการทดลองมีค่าสูง เนื่องจากมีการวัดอุณหภูมิของส่วนควบแน่นเพียงจุดเดียวบนเส้นรอบวงของ RRHP และ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในทางปฏิบัติ ความหนาของฟิล์มของเหลวและการไหลกลับของฟิล์มของมายังส่วนทำระเหย จะไม่เรียบ ไม่สม่ำเสมอ และไม่เป็นเส้นตรง

ในตอนท้ายได้นำสมการสหสมพันธ์ในแนวดิ่งที่หาได้จากการศึกษาเชิงปริมาณไปออกแบบ RRHP เพื่อลดอุณหภูมิของจานเบรค โดยติดตั้ง RRHP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9.5 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ในจานเบรก 15 ท่อ ใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน ที่แรงบิดการเบรคเท่ากับ 75 นิวตันเมตร ช่วงเวลาการเบรค 10 วินาทีต่อครั้ง และเวลาในการทดสอบ 6 นาที จากการคำนวณ RRHP สามารถถ่ายเทความร้อนได้ 392.93 วัตต์ RRHP มีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.54 ซึ่งต่ำกว่าค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณ ทั้งนี้เพราะในการทำงานจริงความยาวของส่วนควบแน่นของแต่ละท่อมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ที่เป็นช่องว่างของจานเบรค อย่างไรก็ตามสมการสหสัมพันธ์นั้น คิดว่าความยาวของส่วนควบแน่นของแต่ละท่อจะมีค่าเท่ากันและเท่ากับความยาวของส่วนทำระเหย ท่อความร้อนแบบหมุนแสดงให้เห็นถึงการมีสมรรถนะที่ดีในการลดอุณหภูมิของจานเบรกรถยนต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved