

การวิเคราะห์คุณลักษณะความถี่ของการไหลผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ด

Analysis of Characteristic Frequency of Flow in Louvered Fins

วิชาติ นวรุ่งเรือง¹ อุดมเกียรติ นนทแก้ว² โอนทัย สุขแสงพนมรุ่ง³

^{1,2} ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พินุลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2586-9542 โทรสาร 0-25870026 กด 111 E-mail: race@kmitnb.ac.th¹, unk@kmitnb.ac.th²

³ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า อ.เมือง จ.นครนายก 26001

โทร 0-3739-3487 ต่อ 62307 Email: asuksang@hotmail.com

คำสำคัญ: ครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ด คุณลักษณะความถี่ การไหลที่ไร้เสถียรภาพ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

บทคัดย่อ

ครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดนิยมใช้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัด เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนที่มีการก่อตัวของชั้นขีตผิวใหม่ ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์คุณลักษณะความถี่ของการไหลแบบไร้เสถียรภาพที่เกิดขึ้นในครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดเพื่ออธิบายและทำความเข้าใจกลไกของการไหลที่ซับซ้อน และมีความเชื่อมโยงกันทั้งสนามการไหล ในการพิจารณาจึงทำการแปลงสนามการไหลที่ขึ้นกับเวลาไปเป็นกราฟของความถี่ ผลการคำนวณพบว่ารูปแบบของขนาดความถี่ที่วัดจากตำแหน่งท้ายน้ำของแต่ละเกล็ดมีรูปแบบของความถี่ที่คล้ายคลึงกัน และได้อธิบายเชื่อมโยงความสัมพันธ์รูปแบบของความถี่เข้ากับลักษณะการไหล ซึ่งค่าความถี่ที่มีสเปกตรัมของพลังงานสูงสุดจะมีนัยสำคัญต่อการไหลเรียกว่าคุณลักษณะความถี่ โดยพบว่าตัวแปรไร้มิติของความถี่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ตัวเลขสตรูฮาล์ และมีความถี่ในการหมุนรอบของครีบบ และเกล็ดที่ใช้ในบทความ

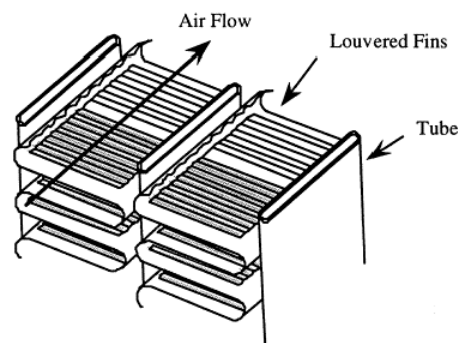
Abstract

Louvered fins are commonly used in many compact heat exchangers to increase the surface area and initiate new boundary layer growth. For this study, characteristic frequencies of instabilities in multi-louvered fins are investigated. To explain and understand the mechanism of the complex flow field, we transform the flow in time domain to frequency domain. The results show that the several of the velocity patterns of the point downstream of each individual louver have the same and common frequency. We discuss for link the frequency pattern to the flow field. The peak of energy spectrum has shown the main characteristic frequency. We found that non-dimensional frequency is related directly with the Strouhal number and the constant of Strouhal number occur for a given louver geometry.

1. บทนำ (Introduction)

ครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยานยนต์ ระบบระบายความร้อนและปรับอากาศ(HVAC) ซึ่งมีลักษณะโดยทั่วไปดังรูปที่ 1 จุดเด่นที่สำคัญคือผิวครีบบเกล็ดช่วยให้สร้างชั้นขีตผิวบางๆขึ้นในแต่ละเกล็ด ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเทียบกับพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วมีประสิทธิภาพที่ดี ด้วยเหตุนี้เองการศึกษาการไหลของอากาศผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อนำองค์ความรู้ไปใช้ในงานออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดให้มีประสิทธิภาพสูงได้

การศึกษาพฤติกรรมของการไหลของอากาศผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดก็เพื่อตอบคำถามเกี่ยวกับกลไกการถ่ายโอนความร้อน และความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับขนาดรูปทรงของครีบบและเกล็ดอย่างไร ซึ่งในอดีตเน้นวิธีการทดลองโดยใช้อุโมงค์ลมเป็นหลัก โดยในการวัดค่าต่างๆต้องใช้เครื่องมือราคาแพง ค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงและยังไม่สามารถวัดได้ละเอียดนักเนื่องจากรูปทรงที่ทำให้เกิดการไหลที่ซับซ้อนนั่นเอง ซึ่งการศึกษาผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้พัฒนาเรื่อยมาเป็นเวลากว่า 20 ปี ตามพัฒนาการของความรู้ด้านการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล



รูปที่ 1 ลักษณะของครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ด

M.Hiramatsu et al. [1] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกริดชนิดเอียงตามเกล็ดแก๊สการของเส้นสายธารด้วยระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง ทำให้การแปลงอนุพันธ์ย่อยง่ายขึ้น ซึ่งให้ผลเฉลยที่ดีเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 200 K.Suga et al. [2] ใช้กริดแบบซ้อนทับแก๊สการอนุรักษโมเมนตัม และพลังงานด้วยระเบียบวิธีผลต่างสลับเนื่อง ซึ่งสามารถทำนายผลการคำนวณได้ดีในช่วงตัวเลขเรย์โนลด์ประมาณ 64-450 แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน และต้องใช้จำนวนกริดมาก T.A.Cowell et al. [3] ได้ศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของครีบบนเกล็ดหลายชนิดโดยใช้ Empirical Formula ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา Chang and Wang [4] ทดลองและศึกษาความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนกับรูปทรงของครีบบนเกล็ดที่ต่างกันจำนวน 91 แบบ สามารถหาความสัมพันธ์กันได้กว่า 90% Springer and Thole [5] ทดลองศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านครีบบนเกล็ดด้วยวิธีการวัดโดยใช้ Laser Dropper Velocimeter (LDV) วัดความเร็วของอากาศผ่านครีบบนเกล็ดจำลองขนาดขยาย 20 เท่า สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของรูปแบบการไหลกับรูปทรงของครีบบนเกล็ดต่างๆ และได้พบปรากฏการณ์สัดของวอร์เทกซ์ที่ท้ายน้ำของครีบบนเกล็ดด้วย

วีระชาติ และคณะ [6, 7] ใช้กริดแบบผสม (Hybrid Mesh) ด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่อง ศึกษาและอธิบายอิทธิพลของการไหลที่มีต่อการกระจายตัวของตัวเลขเนสเซล สัมประสิทธิ์ความดัน และอธิบายกลไกการเกิดความไร้เสถียรภาพของการไหล ตลอดจนอธิบายเหตุที่เกิดการสัดของวอร์เทกซ์ อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลการคำนวณแบบสภาวะคงตัวและไม่คงตัว เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงเกินค่าวิกฤต Tafti and Zhang [8] ศึกษาลักษณะรูปทรงของครีบบนเกล็ดความร้อนแบบเกล็ดที่มีต่อลักษณะการไหล การส่งถ่ายความร้อนไม่คงตัว และคุณลักษณะความถี่จากการสัดของวอร์เทกซ์ อย่างเป็นระบบ โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่องเทียบกับผลการทดลองที่เคยมีมาก่อน

จากผลงานวิจัยที่เคยมีมาก่อนพบว่าปัญหาการไหลของอากาศผ่านครีบบนเกล็ดจะเกิดความไร้เสถียรภาพขึ้นเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์สูงมากกว่าค่าวิกฤต และก่อให้เกิดการสัดวอร์เทกซ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากเมื่อวอร์เทกซ์เคลื่อนที่จะเป็นการทำลายความหนาของชั้นขีดผิว ทำให้อากาศรับความร้อนที่ถ่ายโอนจากผิวของแต่ละเกล็ดบนครีบได้รวดเร็ว แต่การวิเคราะห์เกี่ยวกับการไหลแบบไร้เสถียรภาพนี้ทำได้ไม่มากนัก ดังนั้นในบทความนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์เกี่ยวกับคุณลักษณะความถี่ของการไหล เพื่อให้เข้าใจต่อความเข้าใจกลไกความไร้เสถียรภาพของรูปแบบการไหลที่ซับซ้อน และมีความเชื่อมโยงกันทั่วทั้งสนามการไหลได้ ซึ่งรูปแบบของความถี่ในแต่ละเกล็ดมีความแตกต่างกันไป แต่จะแสดงให้เห็นว่าคุณลักษณะความถี่อยู่ค่าหนึ่งที่สามารถเป็นตัวแทนรูปทรง และระดับพลังงานของของไหล โดยได้แสดงเฉพาะผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของตัวเลขเรย์โนลด์ที่เกินกว่าค่าวิกฤต โดยหวังว่าสามารถใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานอันหนึ่ง ในการประยุกต์สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดกะทัดรัดที่ใช้ครีบบนเกล็ดความร้อนแบบเกล็ด เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงอย่างแท้จริงต่อไป

2. สมการบังคับการไหล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(Governing Equation and Mathematical Model)

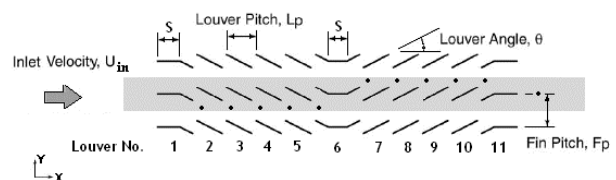
สมการบังคับการไหลเพื่อคำนวณค่าความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิในสนามการไหล ใช้สมการนาวิเยร์-สโตกส์ และสมการอนุรักษพลังงาน ร่วมกับสมการความต่อเนื่อง บนสมมุติฐานว่าอากาศเป็นของไหลแบบไม่อัดตัว มีค่าคุณสมบัติต่างๆคงที่โดยไม่ผันแปรตามอุณหภูมิและความดัน มีตัวเลขเพนเดิล (Prandtl Number) คงที่เท่ากับ 0.744 ของไหลเป็นชนิดนิวโทเนียน การไหลเป็นแบบสภาวะไม่คงตัวใน 2 มิติ ตามระบบพิกัดคาร์ทีเซียน อีกทั้งไม่คิดผลจากการหมุนรอบตัวเองของโลก (Coriolis Acceleration) และไม่คิดผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก ในการประมาณอนุพันธ์ย่อยของสมการบังคับทั้งหมด ใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่อง (FVM) บนกริดทับซ้อน (Staggered Mesh) ประมาณเทอมเวลาด้วยวิธี Second Order Implicit เทอมการพาประมาณด้วยวิธี QUICK เทอมการแพร่ประมาณด้วยวิธี CDS สมการเชื่อมต่อความดัน (Pressure-Velocity Couple) ประมาณด้วยวิธี PISO โดยทั้งหมดคำนวณด้วยโปรแกรม FLUENT® 6.0

สนามการคำนวณดังรูปที่ 2 (แรงง) อากาศไหลเข้าสม่ำเสมอ มีอุณหภูมิคงที่ ทางเข้าห่างเป็น 3 เท่าของ L_p ไปทางซ้ายมือก่อนต้นเกล็ดแรก ด้านทางออกเป็นการไหลแบบปรับตัวสมบูรณ์ (Fully Developed Flow) ที่ตำแหน่งห่างจากปลายขอบเกล็ดสุดท้ายไปทางขวาเป็น 30 เท่าของ L_p ที่ผิวแต่ละเกล็ดไม่มีการสลิไถล และมีอุณหภูมิคงที่ตลอดการคำนวณ บริเวณขอบบนและล่างของสนามการคำนวณเป็นแบบพีริอดิก (Translation Periodic Boundary)

3. รายละเอียดของวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

(Computational Detail)

ครีบบนเกล็ดความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีจำนวน 11 เกล็ด แต่ละเกล็ดมีหมายเลขกำกับเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวา ดังรูปที่ 2 จุดเล็กๆด้านท้ายน้ำของแต่ละเกล็ดเป็นตำแหน่งที่ใช้บันทึกเพื่อคำนวณค่าความถี่ของการไหลในแต่ละเกล็ดโดยห่างจากด้านปลายของแต่ละเกล็ดเป็นระยะ $0.5 L_p$ การแบ่งกริดของสนามการคำนวณใช้แบบผสม (Hybrid Mesh) [6] ใช้จำนวนกริดประมาณ 100,000 สำหรับขนาดและรูปทรงของครีบบนเกล็ดในบทความนี้ใช้เพียงขนาดเดียวในทุกกรณี ดังนี้ ให้ระยะ $S = L_p$, $F_p / L_p = 1.5$, $b / L_p = 0.1$, $\theta = 30^\circ$ และ $L_p = 0.001$ โดยศึกษาเฉพาะผลการผันแปรของตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีต่อการไหลดังนี้ $Re_m = 800$ และ 1,000 การคำนวณเริ่มต้นจากของไหลที่หยุดนิ่ง ใช้ค่าขั้นเวลา (Time Step) คงที่ประมาณ 1-2 ไมโครวินาที ขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 2 สนามการคำนวณ และตำแหน่งที่คำนวณความถี่การไหล

4. การวิเคราะห์กลไกที่ไร้เสถียรภาพของการไหล

(Analysis of Flow Instability Mechanisms)

ปัญหาของรูปแบบการไหลที่ไร้เสถียรภาพผ่านครีบริบายความร้อนแบบเกล็ดนั้น ก่อตัวขึ้นเมื่อ Re_{in} มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต (Re_{cl}) ซึ่งค่าวิกฤตนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของครีบริบายและเกล็ด วีระชาติ และคณะ [7] พบความไม่เสถียรเริ่มเกิดขึ้นที่ด้านท้ายของครีบริบาย ซึ่งเกิดจากการที่ของไหลในระบบจำเป็นต้องรักษาสสมดุลทางไดนามิก ดังนั้นเมื่อพลังงานของวอร์เทกมีมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง การเคลื่อนที่แบบหมุนวนอย่างเดียว (Rotation) ไม่เพียงพอที่จะรักษาสสมดุลในระบบเดิมไว้ได้ วอร์เทกจึงเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม (Translation) ซึ่งเรียกว่าการสลัดวอร์เทก (Vortex Shedding) พบเฉพาะที่เกล็ดตัวสุดท้าย โดยรูปแบบการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า Von-Karman Vortex street ส่วนบริเวณเกล็ดทางด้านในถัดมา พบว่าสภาวะการไหลยังคงมีเสถียรภาพอยู่

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่ม Re_{in} เกินกว่าค่าวิกฤตลำดับที่ 1 (Re_{c1}) ที่กล่าวมาข้างต้นไปอีกระดับหนึ่งจะเกิดความไร้เสถียรมากขึ้นจนสามารถพบได้ทั้งเกล็ดตัวด้านในซึ่งเป็นการเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลอีกชั้นหนึ่ง จึงกำหนดได้ว่าเป็นค่าวิกฤตลำดับที่ 2 (Re_{c2}) Tafti and Zhang [8] ได้สรุปไว้ว่า Re_{c2} ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ Re_{cl} พิจารณารูปที่ 3 (ก) พบว่าเกิดการไหลที่ไร้เสถียรภาพ รวมทั้งการสลัดวอร์เทกขึ้นที่ท้ายน้ำของทุกเกล็ดทั่วไปทั้งสนามการไหล และทวีความรุนแรงขึ้นเมื่อ Re_{in} เพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการไหลผิวอิสระที่มาจากด้านบนและด้านล่างของแต่ละเกล็ดซึ่งมีความเร็วต่างกันมาพบกันท้ายน้ำของแต่ละเกล็ด ทำให้เกิดความไร้เสถียรภาพแบบ Kelvin-Helmholtz คล้ายกับการเกิด Tailing Vortex ที่ท้ายน้ำของปีกเครื่องบินนั่นเอง

จากรูปที่ 3 (ข) แสดงให้เห็นถึงความปั่นป่วนไร้เสถียรภาพของการกระจายตัวของอุณหภูมิ ซึ่งมีรูปแบบสอดคล้องกับความปั่นป่วนไร้เสถียรภาพของการกระจายตัวของวอร์เทกในรูปที่ 3 (ก) แต่พฤติกรรม

นี้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากชั้นขีดผิวทางความร้อน (Thermal Boundary Layer) ในทุกๆ เกล็ดถูกทำลายโดยง่ายด้วยวอร์เทกที่เคลื่อนที่ผ่านมารับความร้อนแล้วสลัดออกไป โดยจะมีวอร์เทกลูกใหม่ถูกสร้างมาแทนที่เป็นวัฏจักร คล้ายคลื่อนน้ำกระแทบชายฝั่ง ซึ่งอาจก่อตัวมาจากความไม่เสถียรบนเกล็ดนั่นเอง หรืออาจถูกพัดพามาจากเกล็ดอื่นๆ ด้วย และเมื่อ Re_{in} มากขึ้นทำให้ชั้นขีดผิวบางลง อีกทั้งยังมีพฤติกรรมความปั่นป่วนกระจายและพัดพาไปทั่วแน่นอนว่าย่อมส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อน แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่กล่าวถึงผลของการถ่ายโอนความร้อน

ด้วยรูปแบบที่ซับซ้อนของการไหลที่มี Re_{in} สูงกว่าค่าวิกฤตลำดับที่ 2 นี้เอง ทำให้เป็นการยากที่จะอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นด้วยมุมมองของการกระจายตัวของความเร็ว ความดัน หรืออุณหภูมิทั้งสนามการไหลในการวิเคราะห์หลักไกการไหลที่ไร้เสถียรภาพที่มีระดับความปั่นป่วนสูงสำหรับการทดลองมักนิยมใช้การเฝ้าสังเกตและวิเคราะห์จากสิ่งที่ได้เห็น (Visualization) แต่ในการคำนวณมักนิยมใช้การเฝ้าติดตามตำแหน่งที่สนใจ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบวัดค่าจุดเดียว (Single Point) แล้วทำการวิเคราะห์ผ่านทางสเปซความถี่ (Frequency Space) เมื่อพิจารณาที่เกล็ดหนึ่งๆ ความไม่เสถียรจะเริ่มก่อตัวจากการไหลหมุนวนอยู่กับที่บริเวณชั้นขีดผิวของเกล็ด และค่อยๆ เคลื่อนตัวออก โดยความถี่จากการเคลื่อนตัวของวอร์เทกนี้เองเป็นตัวแทนที่สามารถชี้วัดขนาดของสภาวะไร้เสถียรภาพได้ดังที่จะได้แสดงไว้ในข้อหัวถัดไป

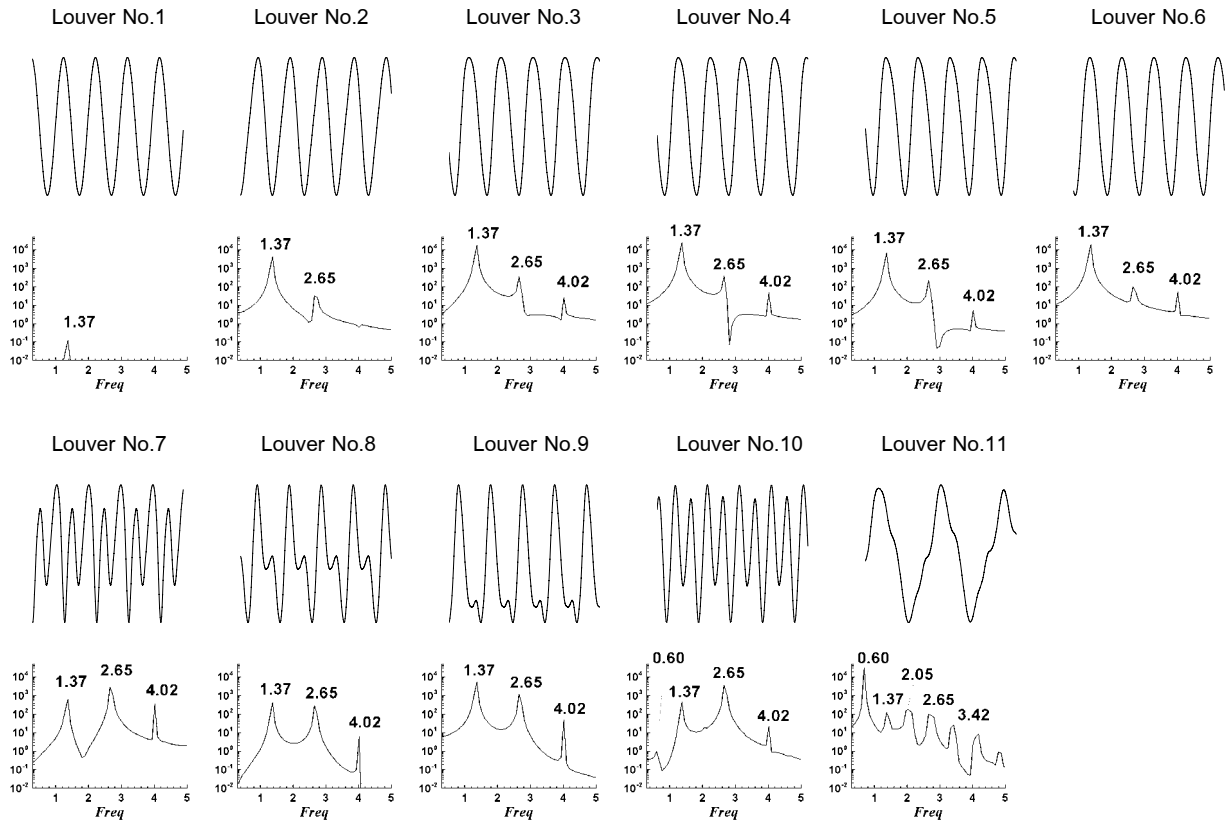


(ก) การกระจายตัวของวอร์เทก

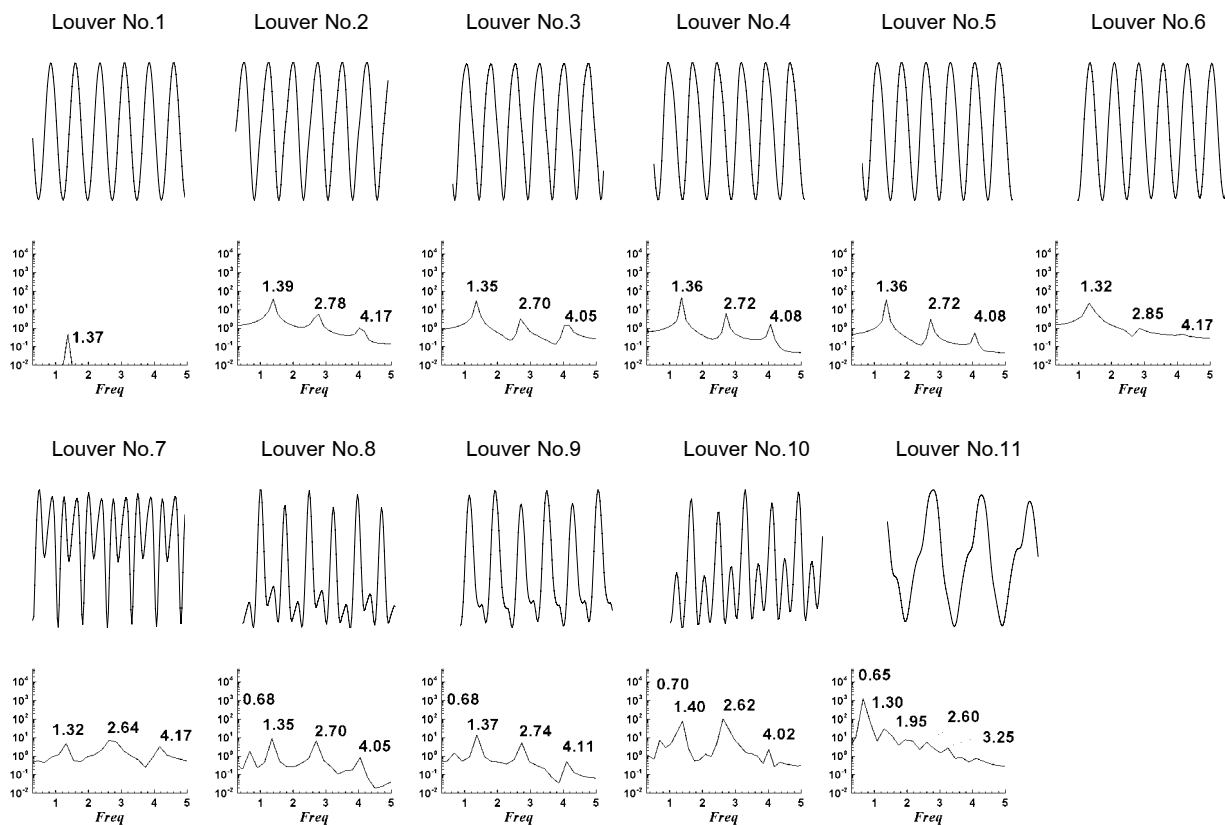


(ข) การกระจายตัวของอุณหภูมิ

รูปที่ 3 เปรียบเทียบสภาวะการไหลที่ไร้เสถียรภาพที่ $Re_{in} = 800$ และ 1,000



(ก) ผลการคำนวณที่ $Re_{in} = 800$



(ข) ผลการคำนวณที่ $Re_{in} = 1000$

รูปที่ 4 แสดงรูปแบบของขนาดความเร็วที่ไร้เสถียรภาพ และคุณลักษณะความถี่ของแต่ละเกล็ด

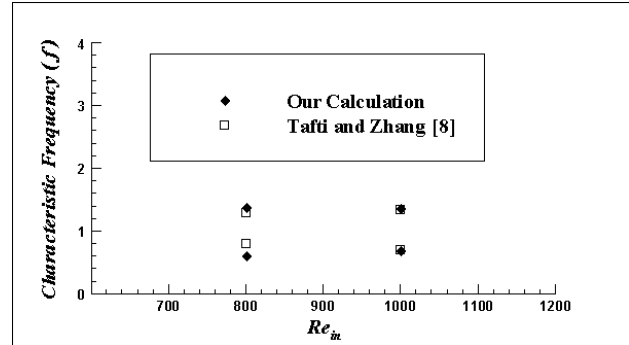
5. การวิเคราะห์คุณลักษณะความถี่ของการไหล

(Analysis of Characteristic Frequency)

ของไหลในสภาวะไร้เสถียรภาพ จะเกิดการกระเพื่อม(Fluctuation) ขึ้นในทุกปริมาณที่มีการส่งถ่ายอยู่ภายในสนามการไหล เช่นความเร็ว ความดัน และอุณหภูมิ ดังในรูปที่ 4 ได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของขนาดความเร็ว ($|V|$) ในตำแหน่งท้ายน้ำของแต่ละเกล็ด จากผลการคำนวณพบว่าเกล็ดทางด้านหน้า (หมายเลข 1-6) มีรูปแบบที่สลับขึ้นลงสม่ำเสมอและคล้ายๆกันในแต่ละเกล็ด แต่เกล็ดทางด้านหลัง (หมายเลข 7-11) มีรูปแบบที่ซับซ้อนกว่าซึ่งยากต่อการพิจารณา จึงได้นำค่าความเร็วนี้ไปแปลงฟูริเยร์ เพื่อวิเคราะห์ในรูปแบบของความถี่ โดยกราฟที่พิจารณา ในแกนตั้งเป็นสเปกตรัมของพลังงาน (E) ที่มากกว่า 0.01 และแกนนอนเป็นความถี่ (f) ที่ต่ำกว่า 5 ซึ่งทั้งหมดแสดงแบบไร้หน่วย โดยงานวิจัยนี้ใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (FFT) ในทุกๆตำแหน่งที่บันทึกเพื่อคำนวณค่าความถี่ ความถี่ที่มีพลังงานสูงจะมีนัยสำคัญต่อการไหล กล่าวคือเป็นความถี่หลักในการกระเพื่อม เรียกว่าคุณลักษณะความถี่ (Characteristic Frequency)

พิจารณารูปที่ 4 (ก) ที่ค่า Re_{in} เท่ากับ 800 เกล็ดหมายเลข 1-6 ความถี่ที่มีพลังงานสูงสุดคือ 1.37 ที่เกล็ดหมายเลข 1 มีพลังงานน้อยที่สุดเนื่องจากเป็นเกล็ดแรกที่เปลี่ยนทิศทางการไหลจากในแนวระนาบเป็นแนวเกล็ด และได้รับการรบกวนจากเกล็ดข้างๆกันน้อย แต่เกล็ดถัดไปทางขวามีพลังงานสูงขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกัน และจะพบความถี่พ้องลำดับที่ 2 และ 3 (Super Harmonic) เป็นจำนวนเท่าของคุณลักษณะความถี่ ซึ่งเกิดจากการสะท้อนคลื่นความถี่จากการไหลในเกล็ดข้างๆ เนื่องจากมีมุมเฟสต่างกัน ดูได้จากกราฟของขนาดความเร็ว การสะท้อนคล้ายกลไกของเสียงในกระบอกปลายปิด เมื่อพิจารณาที่เกล็ดหมายเลข 7-10 พบว่าคุณลักษณะความถี่ที่ 1.37 ในบางเกล็ดไม่ได้มีพลังงานสูงสุด แต่เป็นความถี่พ้องลำดับที่ 2 มีค่าสูงสุดในกรณีเกล็ดที่ 7 และ 10 เนื่องจากเส้นการเคลื่อนที่ของของไหลที่หลุดมาจากการกระเพื่อมของเกล็ดหมายเลข 5 เข้าปะทะเกล็ดหมายเลข 7 พอดี และเข้าแทรกสอดในเฟสเดียวกันกับความถี่พ้องของเกล็ดหมายเลข 7 และในลักษณะเดียวกันของไหลเคลื่อนที่จากเกล็ดหมายเลข 7 เข้าปะทะเกล็ดหมายเลข 10 ที่เฟสความถี่พ้องตรงกัน ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานให้มากขึ้นตามลำดับนั่นเอง และในเกล็ดหมายเลข 11 ซึ่งเป็นเกล็ดตัวท้ายมีรูปร่างต่างออกไป และด้านท้ายไม่มีเกล็ดอื่นได้อีก ซึ่งให้คุณลักษณะความถี่ต่ำคือ 0.6 แต่พลังงานสูง เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ในรูปแบบ Von-Karman Vortex street ซึ่งได้กล่าวไว้ในตอนต้น วอร์เทกซ์ที่ท้ายน้ำเกิดจากการก่อตัวของกระแสวนไหลที่ความเร็วต่างกันบริเวณเวค (Wake) ซึ่งมีกลไกต่างจากการก่อตัวของเกล็ดด้านในที่เกิดจากความไม่เสถียรที่ชั้นขีดผิว ด้วยเหตุนี้ความไม่เสถียรที่เริ่มเกิดที่เกล็ดตัวท้ายจาก Re_{c1} จึงไม่ขึ้นอยู่กับ Re_{c2} ที่เป็นการไร้เสถียรภาพของเกล็ดด้านใน และความถี่ต่ำที่มีพลังงานสูงนี้มีพลังงานมากพอที่จะรบกวนความถี่ของเกล็ดถัดไปที่ต้นน้ำได้ ดังแสดงในเกล็ดหมายเลข 10 พบความถี่ต่ำเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่าความถี่ย่อย (Sub Harmonic) ซึ่งมีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของคุณลักษณะความถี่ ผลการคำนวณไม่พบปรากฏการณ์นี้ตั้งแต่

เกล็ดหมายเลข 9 เป็นต้นไป นั้นแสดงว่าพลังงานที่ไปรบกวนการไหลของเกล็ดด้านต้นน้ำมีจำกัดเช่นกัน



รูปที่ 5 คุณลักษณะความถี่ที่คำนวณได้ เทียบกับ Tafti and Zhang [8]

เมื่อเพิ่มพลังงานของของไหลที่ทางเข้า ซึ่งก็คือการเพิ่ม Re_{in} ดังในรูปที่ 4 (ข) ที่ค่า Re_{in} เท่ากับ 1000 พบว่าพลังงานความถี่ต่ำของเกล็ดหมายเลข 11 สามารถรบกวนการไหลของเกล็ดด้านต้นน้ำได้ถึงเกล็ดหมายเลข 8 แต่มีค่าที่ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยเนื่องจากความถี่ต่ำที่เกล็ดหมายเลข 8-10 ได้รับอิทธิพลของคุณลักษณะความถี่บังคับอยู่ ซึ่งความถี่ต่ำที่เป็นความถี่ย่อย (Sub Harmonic) จะเป็นครึ่งหนึ่งของคุณลักษณะความถี่ในแต่ละเกล็ดนั่นเอง หากพิจารณาที่เกล็ดในแต่ละหมายเลข พบว่าคุณลักษณะความถี่ไม่เท่ากันแตกต่างกันเล็กน้อย แต่โดยเฉลี่ยแล้วถือว่าใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะที่ Re_{in} นี้ระบบกำลังเข้าสู่ช่วงผันผวน (Transition) ซึ่งไม่สามารถทำนายพฤติกรรมได้แม่นยำนัก หรือข้อมูลที่นำมาคำนวณอาจไม่ละเอียดเพียงพอ ในส่วนของเกล็ดหมายเลข 1-6 สามารถอธิบายกลไกได้เช่นเดียวกับที่ผ่านมา

พิจารณารูปแบบขนาดของความเร็วที่ Re_{in} ต่างกันดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) พบว่ามีความเชื่อมโยงในรูปแบบที่คล้ายกัน เนื่องมาจากลักษณะการไหลผ่านครีบและเกล็ดที่มีรูปร่างเดียวกัน ดังนั้นมุมปะทะ (Angle of Attack) จึงเป็นแนวใกล้เคียงกันโดยเฉพาะในบริเวณเกล็ดหมายเลข 1-6 ซึ่งมีลักษณะการไหลผ่านช่องของเกล็ด การกระเพื่อมของเกล็ดตัวหนึ่งส่งอิทธิพลถึงเกล็ดข้างๆกันไม่มาก ดูได้จากความถี่พ้องลำดับสูงๆขึ้นไป (Super Harmonic) มีพลังงานต่ำ แต่เมื่อพิจารณาเกล็ดที่ 7-10 พบว่ามีอิทธิพลจากความเร็วกระเพื่อมที่พัดพามาจากเกล็ดตัวหน้าทำให้ความถี่พ้องมีพลังงานสูงขึ้นตามที่ได้กล่าวไว้แล้วนั่นเอง ในเกล็ดที่ 11 ซึ่งเป็นเกล็ดตัวสุดท้าย มีรูปแบบของขนาดความเร็วที่แตกต่างไปจากเกล็ดอื่นๆ เนื่องจากมีกลไกการก่อตัวของวอร์เทกซ์ต่างกับเกล็ดด้านใน โดยสะสมพลังงานก่อตัวเป็นวอร์เทกซ์ขนาดใหญ่สลับกันระหว่างด้านบนกับด้านล่างของเกล็ด (Primary Vortex) ซึ่งต้องรอการก่อตัวของวอร์เทกซ์ขนาดเล็กที่จะสะสมพลังงานและเคลื่อนมาแทนที่ (Secondary Vortex) ทำให้ใช้เวลานานจึงสามารถเคลื่อนตัวสลับวอร์เทกซ์ ปรากฏการณ์นี้คล้ายกับการสลับวอร์เทกซ์ของของไหลที่ผ่านหน้าดัดทรงกระบอก

ผลการคำนวณค่าคุณลักษณะความถี่เปรียบเทียบกับ Tafti and Zhang [8] ดังรูปที่ 5 พบว่ามีความสอดคล้องกันดีมากที่ $Re_{in} = 1000$ ส่วนที่ $Re_{in} = 800$ มีความแตกต่างบ้างแต่ไม่มากนัก ค่าคุณลักษณะความถี่ที่มากกว่า 1 เกิดจากการไหลผ่านเกล็ดด้านใน สำหรับค่าที่ต่ำกว่า 1 เกิดจากความถี่ต่ำของเกล็ดตัวสุดท้าย ซึ่งถือว่าสอดคล้องกันดี

6. บทสรุป และแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคต

(Conclusions and Further Investigation)

การวิเคราะห์คุณลักษณะความถี่ของการไหลผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดสามารถอธิบายกลไกที่มีความซับซ้อน ไร้เสถียรภาพของการไหลได้เป็นอย่างดี จากผลการคำนวณพบว่ารูปแบบของขนาดความเร็ว ณ ตำแหน่งท้ายน้ำของแต่ละเกล็ดแตกต่างกัน โดยเกล็ดด้านหน้า (หมายเลข 1-6) มีรูปแบบใกล้เคียงกัน เกล็ดทางด้านหลัง (หมายเลข 7-11) มีรูปแบบที่ต่างกันออกไป แต่ความถี่ที่ตำแหน่งท้ายน้ำของแต่ละเกล็ดมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอยู่ ซึ่งความถี่ที่มีนัยสำคัญต่อระบบเรียกว่า คุณลักษณะความถี่ มีค่าประมาณ 1.35 เมื่อพิจารณาตัวแปรไร้หน่วยของความถี่นี้พบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับตัวเลขสตรูฮอลล์ (St) ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า รูปทรงของครีบบและเกล็ดที่พิจารณาในช่วง $800 < Re_{in} < 1000$ มีค่า St คงที่ประมาณ 8.48 โดยความหมายทางกายภาพของ St คืออัตราส่วนระหว่างพลังงานการหมุนวนเทียบกับพลังงานจลน์ของอนุภาคของไหล ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นตัวแทนความไร้เสถียรภาพของการไหลได้

ในลำดับต่อไปจะศึกษาถึงผลของรูปแบบการไหลที่มีต่อการถ่ายโอนความร้อน และความดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านอากาศทางเข้ากับทางออก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบครีบบแบบเกล็ดในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgments)

ขอขอบคุณ กลุ่มบริษัทไทยเรดิเอเตอร์ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านข้อมูล และความร่วมมือด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลองจนโปรแกรมการคำนวณต่างๆ

สัญลักษณ์ (Nomenclature)

F_p	ระยะระหว่างครีบบ (m)
L_p	ระยะระหว่างเกล็ด (m)
θ	มุมเอียงของเกล็ด (องศา)
b	ความหนาของเกล็ด (m)
S	ความยาวแนวราบของเกล็ดตัวแรก ตัวกลาง และตัวท้าย (m)
U_{in}	ความเร็วของอากาศทางเข้า (m/s)
$ V $	ขนาดของความเร็ว (m/s)
Re_{in}	ตัวเลขเรย์โนลด์ที่ทางเข้า $[\rho U_{in} L_p / \mu]$
Re_{c1}	ตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตลำดับที่ 1
Re_{c2}	ตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤตลำดับที่ 2
E	ตัวแปรไร้หน่วยของสเปกตรัมพลังงาน

(Non Dimensional Energy Spectrum)

f^*

ความถี่ของการไหล (S^{-1})

f

ตัวแปรไร้หน่วยของความถี่ $[L_p f^* / U_{in}]$

St

ตัวเลขสตรูฮอลล์ (Strouhal Number) $[2\pi f^*]$

เอกสารอ้างอิง (Reference)

- [1] M.Hiramatsu, T.Ishimaru and K.Matsuzaki, "Research on Fins for Air Conditioning Heat Exchangers", JSME International Journal, Series II, Vol.33, No.4, 1990, p749-756.
- [2] K.Suga, H.Aoki and T.Shinagawa, "Numerical Analysis on Two-Dimensional Flow and Heat Transfer of Louvered Fins Using Overlaid Grids", JSME International journal, Series II, Vol.33, No.1, 1990, p122-127.
- [3] T.A.Cowell, M.R.Heikal and A.Achaichia, "Flow and Heat transfer in Compact Louvered Fin Surfaces", Experimental Thermal and Fluid Science, No.10, 1995, p192-199.
- [4] Yu-Juei Chang and Chi-Chuan Wang, "A Generalized Heat Transfer Correlation for Louver Fin Geometry", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.40, No.3, 1997, p533-544.
- [5] M.E.Springer and K.A.Thole, "Entry Region of Louvered Fin Heat Exchangers", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.19, No.4, 1999, p223-232.
- [6] วีรชาติ นวรุ่งเรือง อุดมเกียรติ นนทแก้ว และอโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง, "การจำลองสนามการไหลของอากาศผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ดด้วยเงื่อนไขที่ขอบแบบพีรอกดิก", สัมมนาวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16, พ.ศ. 2545, หน้า206-210
- [7] วีรชาติ นวรุ่งเรือง อโนทัย สุขแสงพนมรุ่ง และอุดมเกียรติ นนทแก้ว, "การวิเคราะห์ผลการไหลแบบสภาวะไม่คงตัวผ่านครีบบระบายความร้อนแบบเกล็ด", การประชุมวิชาการ การถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนครั้งที่ 1, พ.ศ. 2546 หน้า31-35
- [8] D.K.Tafti and X.Zhang, "Geometry Effects on Flow Transition in Multilouvered Fins - Onset, propagation, and Characteristic Frequencies", International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 44, No.22, 2001, p4195-4210.

