

Abstract

Project Code: RMU5080047

Project Title: Manipulation and Control of The Entrainment of A Jet in Crossflow

Investigator: Assc. Prof. Asi Bunyajitradulya

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University

E-mail Address: asi.b@chula.ac.th

Project Period: June 25, 2007 to June 24, 2010

A scheme to manipulate and control the trajectory and entrainment of a jet in crossflow (JICF) is devised and investigated. The scheme is based on the premise that, since the trajectory and entrainment of JICF is closely related to the formation of the large-scale vortical structures in the flow, the effective scheme to manipulate and control JICF should then be focusing on the manipulation of the near-field flow shear layers, the origin of these structures. To implement this, 1) a number of control jets are used to manipulate the near-field flow shear layers, and 2) they are strategically installed at various azimuthal positions near the jet exit, the location near where the near-field flow shear layers are at the onset of developing. The effects of the two control parameters: the azimuthal position (θ) of the control jets and the total control jet to main jet mass flowrate ratio (r_m), on jet trajectory, entrainment, and structures are investigated. The experiment is conducted for the JICF with the effective velocity ratio 4 and the jet Reynolds number 22,000. The velocity fields are surveyed with a single-sensor hot-film anemometer. It is found that azimuthal control jets can be used to manipulate and control the jet trajectory, entrainment, and structures. On trajectory, the result shows that when the control jets are deployed on the windward side, the center-plane velocity trajectory of the controlled JICF is lower than the uncontrolled one; while deployed on the leeward side, higher. The optimum values of the two control parameters such that the jet trajectory is lowest and the jet entrainment is potentially highest are found to be $(\theta, r_m) = (\pm 15^\circ, 2\%)$. Velocity distributions in various cross planes are subsequently measured for the uncontrolled case (JICF) and this optimal control case (I15). The result shows that the control jets in this optimal control case have the effects in lowering, in addition to the center-plane trajectory, the centroid and center-of-mass trajectories as well when compared to JICF. On entrainment, the result shows that the use of azimuthal control jets in this optimal case helps enhancing entrainment over that of JICF by approximately 10% at $x/rd = 1.5$ and 20% at $x/rd = 4$. On jet structures, the results show that the deployment of the control jets at the optimal condition has the effect in suppressing

(the development of) the windward jet shear layer while promoting (the development of) the lateral skewed mixing layers, later developing into two dominant lateral streamwise counter-rotating vortical structures. This in turn explains the lower trajectories, the larger lateral spreading, and the higher entrainment of the controlled JICF when compared to those of JICF. Finally, the entrainment mechanisms of the vortical structures in JICF and controlled JICF are envisaged, compared, and discussed. Consequently, two separation distances: *spanwise* and *wall separations*, are identified as governing (the blocking of) the jet entrainment. Spanwise separation governs *mutual blocking* of each of the lateral streamwise vortical structure entrainment; wall separation governs *wall blocking* of the structures entrainment. Specifically, if spanwise separation is too small, mutual blocking of each of the lateral streamwise vortical structure occurs; if wall separation is too small, wall blocking of the structures entrainment occurs; both result in diminishing of entrainment. Broad guides for tuning the two control parameters (θ, r_m) for effective entrainment can accordingly be suggested. Finally, the jet response to the control supports the model for the formation of the counter-rotating vortex pairs (CVP) via the development of the skewed mixing layer along the surrounding crossflow direction and around the jet exit column.

Keywords jet in crossflow, manipulation and control, trajectory, entrainment, mixing

บทคัดย่อ

Project Code: RMU5080047

ชื่อโครงการ: การปรับแต่งและควบคุมการเหินย่นำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง

ชื่อนักวิจัย: รศ.ดร. อติ บุญจิตราดุลย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail Address: asi.b@chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ: 25 มิถุนายน 2550 ถึง 24 มิถุนายน 2553

โครงการนี้ได้ศึกษาประดิษฐ์วิธีการในการควบคุมเส้นทางเดินและการเหินย่นำการผสมของเจ็ดในกระแสมขวาง โดยแนวคิดของวิธีการควบคุมนี้มีพื้นฐานมาจากหลักฐานที่ว่า เส้นทางเดินและการเหินย่นำการผสมของเจ็ดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการก่อตัวของโครงสร้างการไหลหมุนควงคู่หลักของการไหล ดังนั้น วิธีการควบคุมที่น่าจะมีประสิทธิภาพควรต้องมุ่งเน้นที่การปรับแต่งโครงสร้างการไหลเหนือบริเวณใกล้ปากเจ็ดซึ่งเป็นจุดกำเนิดของโครงสร้างการไหลหมุนควงคู่หลัก ในการประยุกต์แนวคิดนี้ในการใช้งาน 1) จึงได้ใช้เจ็ดควบคุมในการปรับแต่งโครงสร้างการไหลเหนือบริเวณใกล้ปากเจ็ด และ 2) เจ็ดควบคุมเหล่านี้ถูกจัดวางอย่างมียุทธวิธีในตำแหน่งตามแนวเส้นรอบวงที่ทางออกใกล้ปากเจ็ดซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้บริเวณที่โครงสร้างการไหลเหนือบริเวณใกล้ปากเจ็ดเริ่มจะมีการพัฒนาตัว โครงการนี้ได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรควบคุม 2 ตัวคือ ตำแหน่งของเจ็ดควบคุมตามแนวเส้นรอบวง (θ) และอัตราส่วนเชิงมวลของเจ็ดควบคุมต่อเจ็ดหลัก (r_m) ต่อเส้นทางเดิน การเหินย่นำการผสม และโครงสร้างการไหลหลักของเจ็ด การทดลองทำสำหรับเจ็ดในกระแสมขวางที่มีอัตราส่วนความเร็วประสิทธิผลระหว่างเจ็ดหลักต่อกระแสมขวางเท่ากับ 4 และเรโนลส์นัมเบอร์ของเจ็ดเท่ากับ 22,000 สหามความเร็วของการไหลได้วัดด้วยเครื่องมือวัดความเร็วแบบฟิล์มร้อน ผลการศึกษา พบว่า เราสามารถใช้เจ็ดควบคุมในการปรับแต่งและควบคุม เส้นทางเดิน การเหินย่นำการผสม และโครงสร้างการไหลหลักของเจ็ดในกระแสมขวางได้ นอกจากนั้นยังพบว่า สำหรับเส้นทางเดิน การฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งต้นลมของเจ็ดหลักจะมีผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดในระนาบกลางต่ำลง ในขณะที่การฉีดเจ็ดควบคุมที่ตำแหน่งท้ายลมของเจ็ดหลักจะมีผลทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดสูงขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า ค่าของตัวแปรควบคุมที่ทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดต่ำสุดคือ $(\theta, r_m) = (\pm 15^\circ, 2\%)$ เมื่อได้กรณีนี้เส้นทางเดินของเจ็ดต่ำสุดแล้ว จึงทำการวัดสหามความเร็วของการไหลตามระนาบขวางต่างๆตามแนวการไหลอย่างละเอียดในทั้งกรณีที่ไม่ได้ควบคุม (JICF) และกรณีควบคุมที่ทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดต่ำสุด (I15) ข้างต้น ผลการศึกษาพบว่า การฉีดเจ็ดควบคุมในกรณี I15 นอกเหนือจากจะทำให้เส้นทางเดินของเจ็ดในระนาบกลางต่ำลงกว่าเส้นทางเดินของ JICF แล้ว จะยังทำให้เส้นทางเดินเซ็นทรอยด์และเส้นทางเดินศูนย์กลางมวลต่ำลงกว่าเส้นทางเดินของ JICF ด้วย สำหรับการเหินย่นำการผสม ผลการศึกษาพบว่า การฉีดเจ็ดควบคุมในกรณี I15 นั้น จะทำให้การเหินย่นำการผสมของเจ็ดหลักเพิ่มขึ้นจากกรณี JICF ประมาณ 10% ที่ตำแหน่ง $x/rd = 1.5$ และ 20% ที่ตำแหน่ง $x/rd = 4$ สำหรับโครงสร้างการไหลหลัก ผลการศึกษาพบว่า การฉีดเจ็ดควบคุมในกรณี I15 จะมีผลไปหยุดยั้งหรือบั่นทอนการพัฒนาตัวของ

โครงสร้างการไหลเวียนด้านต้นลมของเจ็ต ในขณะที่จะไปส่งเสริมการพัฒนาดัชนีของโครงสร้างการไหลเวียนผสมแบบสกีวต์ ซึ่งได้พัฒนาดัชนีต่อไปเป็นโครงสร้างการไหลหมุนควงคู่หลักแบบหมุนตรงกันข้ามที่มีแกนการหมุนขนานกับทิศทางลม การพัฒนาดัชนีของโครงสร้างการไหลหมุนควงคู่หลักนี้เองสามารถนำมาอธิบายการลดต่ำลงของเส้นทางเดิน การขยายตัวออกทางด้านข้าง และการเพิ่มขึ้นของการเหนี่ยวนำการผสมของ I15 เมื่อเทียบกับ JICF จากผลการศึกษานี้ จึงนำมาสร้างเป็นแนวคิดของกลไกการเหนี่ยวนำการผสม โดยได้แบ่งขึ้นถึงระยะห่างสองระยะที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำการผสม คือ ระยะห่างระหว่างคู่โครงสร้างการไหลหมุนควงหลัก และ ระยะห่างของคู่โครงสร้างการไหลหมุนควงหลักจากผนัง กล่าวคือ เมื่อระยะห่างระหว่างคู่โครงสร้างการไหลหมุนควงหลักมีค่าน้อย จะทำให้เกิดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมกันเองของคู่โครงสร้างการไหลหมุนควงหลัก ในขณะที่ เมื่อระยะห่างของคู่โครงสร้างการไหลหมุนควงหลักจากผนังมีค่าน้อย จะทำให้เกิดการขัดขวางการเหนี่ยวนำการผสมจากผนัง เนื่องจากคู่โครงสร้างการไหลหมุนควงหลักอยู่ชิดผนังเกินไป ดังนั้น จึงสามารถให้แนวทางในการปรับแต่งค่าของตัวแปรควบคุม (θ, r_m) เพื่อให้การเหนี่ยวนำการผสมมีประสิทธิภาพได้ ท้ายสุด ผลของการตอบสนองของเจ็ตหลักต่อการกระตุ้นของเจ็ตควบคุมในการศึกษานี้ สนับสนุนแนวคิดของการเกิดโครงสร้างการไหลหมุนควงคู่หลักแบบหมุนตรงกันข้ามจากการพัฒนาดัชนีของโครงสร้างการไหลเวียนผสมแบบสกีวต์ตามแนวทิศทางกระแสลมขวางรอบคอลัมน์ของเจ็ตที่บริเวณปากทางออก