

การวัดความเร็วของของไหล

โดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาค (ตอนที่ ๒)

ร.อ.โรสาลี มหิธร
กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเร็ว

จากฉบับที่แล้วผู้อ่านได้ทราบหลักการและวิธีการของการวัดความเร็วของของไหลโดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาค (Particle Image Velocimetry, PIV) ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการใหม่และได้รับการพัฒนามาในช่วงเวลาไม่นานมานี้ แต่กำลังได้รับความนิยมและนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวางแทนที่การวัดความเร็วของของไหลโดยวิธีเก่า เช่น การใช้ Pitot tube, Anemometer, Ventury meter ฯลฯ เนื่องจากวิธีการหรือเทคนิค PIV นี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการอื่น ๆ คือ เป็นการวัดความเร็วของของไหลได้ทั้งระนาบจากการวัดเพียงครั้งเดียว ไม่มีเครื่องมือหรือสิ่งกีดขวางใด ๆ ยื่นเข้าไปขวางเส้นทางการไหลของของไหลและสามารถวัดความเร็วในขณะใดขณะหนึ่งก็ได้ (Instantaneous measurement) อย่างไรก็ตาม เทคนิค PIV นั้นยังมีข้อเสียอยู่คือ ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง เนื่องจากต้องการ ความแม่นยำในการควบคุมสูงและต้องใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย แต่เนื่องจากในชีวิตประจำวันของเรายังต้องมีความเกี่ยวข้องกับการไหลของของไหลในสภาวะต่าง ๆ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีการไหลมากมายที่มีลักษณะค่อนข้างซับซ้อนโดยที่เราไม่สามารถวิเคราะห์และคำนวณรูปแบบการไหลออกมาได้ ดังนั้น การได้ข้อมูลที่สำคัญของการไหลต่าง ๆ นั้น ต้องนำมาจากทดลอง วิศวกรและนักฟิสิกส์ ซึ่งเป็นตัวหลักสำคัญพยายามหาวิธีการต่าง ๆ ในการหาข้อมูลการไหลที่ซับซ้อนเหล่านี้ เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลเหล่านี้ และในปัจจุบัน เทคนิค PIV ก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ผู้เขียนจะได้กล่าวต่อไปว่าเทคนิค PIV นี้นำไปใช้ประโยชน์ในด้านใดบ้าง

หลักการของเทคนิค PIV

ผู้เขียนขอกล่าวโดยย่อเกี่ยวกับหลักการของเทคนิค PIV เพื่อทบทวนให้ผู้อ่านเข้าใจและคุ้นเคยกับเทคนิค PIV. Particle Image Velocimetry เป็นวิธีการในการวัดความเร็วของของไหล โดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาค การใช้เทคนิคนี้จะต้องใส่หรือเติมอนุภาคเล็ก ๆ ที่มีแรงลอยตัวเป็นศูนย์หรือใกล้เคียง (สามารถแขวนลอยอยู่ในของไหลได้) ลงไปในของไหลเพื่อใช้เป็นตัวติดตามการไหล จากนั้นพื้นที่ที่จะทำการวัดความเร็วก็จะถูกแผ่นลำแสงที่มีความเข้มสูงส่องผ่าน ส่วนมากจะใช้ลำแสงจากเลเซอร์ ตำแหน่งของอนุภาคที่อยู่ในของไหลก็ถูกบันทึกไว้โดยกล้องบันทึกภาพ (ฟิล์มหรือกล้องดิจิทัล) ตำแหน่งของอนุภาคจะถูกบันทึกไว้สองครั้งหรือมากกว่าในช่วงเวลาที่สั้นมาก จากนั้น ก็จะนำภาพที่บันทึกไว้ไปคำนวณ หากระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เมื่อทราบระยะทาง

และช่วงเวลาสั้น ๆ ระหว่างการบันทึกภาพของอนุภาค ก็สามารถคำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ได้

ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้เทคนิค PIV

ทางด้านอากาศพลศาสตร์

การวัดรูปแบบการไหลและความปั่นป่วนของกระแสน้ำรอบ ๆ ตัวยานยนต์ รถไฟ และเครื่องบิน ถูกนำไปใช้ในการพัฒนารูปแบบเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพในทางอากาศพลศาสตร์มาเป็นเวลานาน นักออกแบบต้องอาศัยความเข้าใจการไหลของอากาศรอบยานพาหนะเป็นอย่างดี เพื่อที่จะได้ออกแบบมีลักษณะเพรียว มีแรงต้านอากาศต่ำ นอกจากนี้การศึกษาอากาศพลศาสตร์ยังได้รวมไปถึง



รูปที่ ๑ การศึกษาการไหลของอากาศบริเวณส่วนท้ายของรถยนต์

อาคารสูง กังหันลม กระสวยอวกาศ และสะพานต่าง ๆ ซึ่งนักออกแบบจะต้องศึกษาอิทธิพลของการไหลของอากาศที่มีต่ออาคารและสิ่งก่อสร้างเหล่านั้นเพื่อที่จะได้ออกแบบให้รองรับต่ออิทธิพลเหล่านั้นได้ การศึกษาการไหลของอากาศรอบ ๆ ยานพาหนะหรือสิ่งก่อสร้างเหล่านี้ส่วนใหญ่จะทำในอุโมงค์ลม เทคนิค PIV ก็จะมีส่วนสำคัญในการศึกษานี้ ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

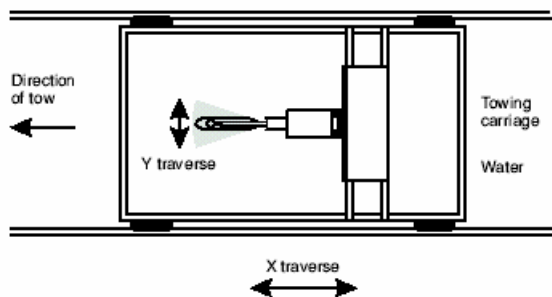
อากาศพลศาสตร์จะเป็นไปในรูปของการประหยัดเชื้อเพลิง ความมีประสิทธิภาพที่มากขึ้นของ

สิ่งก่อสร้างและการลดระดับเสียงรบกวน (เช่น จากการสั่นสะเทือนเนื่องจากการไหลผ่านของอากาศ) ตัวอย่างที่มีการนำเทคนิค PIV ไปใช้งาน เช่น การศึกษาจากอากาศพลศาสตร์ของตัวถังรถยนต์ (ดังตัวอย่างในรูปที่ ๑) การลดแรงต้านอากาศ อากาศพลศาสตร์ของรถไฟ การไหลของอากาศในห้องผู้โดยสาร การไหลของของไหล ในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ การทดสอบแบบจำลองของเครื่องบิน การศึกษาการทำงานของใบพัดของเครื่องบินชนิดปีกหมุน ใบพัดของกังหันลม และการนำไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณรูปแบบการไหลชนิดต่าง ๆ

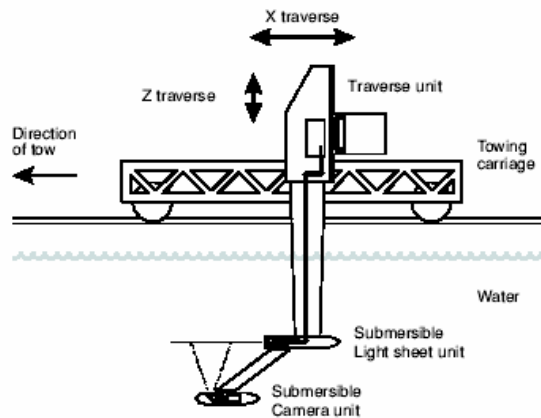
ทางด้านชลพลศาสตร์

ได้มีการนำเทคนิค PIV ไปใช้ในการวัดคุณลักษณะการไหลของน้ำรอบ ๆ ตัวเรือ ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับคือ การออกแบบตัวเรือเพื่อลดแรงต้านทาน การเพิ่มความคงตัว และเพิ่มประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน ตัวอย่างการนำเทคนิค PIV ไปใช้งานด้านชลพลศาสตร์ เช่น การออกแบบตัวเรือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน การไหลในท่อ การไหลในช่องทางเปิด (Channel Flows), การป้องกันการเกิด Cavitation (ที่ใบจักรเรือและที่พัดน้ำ) และพลศาสตร์ของฟองอากาศ ในรูปที่ ๒ และรูปที่ ๓ จะแสดงให้เห็นถึงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการไหลของน้ำบริเวณตัวเรือได้แนวน้ำใน Towing

tank ซึ่งอุปกรณ์จะถูกติดตั้งบนชุดล้อเลื่อนเหนือ towing tank และสามารถลากไปตามทิศทางที่เรือถูกลากไปด้วยความเร็วที่เท่ากัน ชุดทดลองจะมีส่วนที่จมลงไปได้ น้ำนั้นคือกลองสำหรับบันทึกภาพและชุดเลนส์ที่จะให้แผ่นลำแสงถูกฉายออกไปยังบริเวณที่ต้องการวัดการไหล ตำแหน่งของกลองและชุดเลนส์สามารถปรับได้ทั้ง ๓ มิติ จึงทำให้สามารถวัดการไหลได้ทุกตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ ๒ ชุดทดลองการวัดการไหลใน towing tank (ภาพด้านบน)

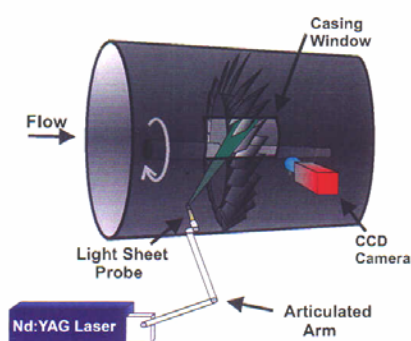


รูปที่ ๓ ชุดทดลองการวัดการไหลใน towing tank (ภาพด้านล่าง)

ทางด้านการสันดาปภายใน

เทคนิค PIV ถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยวิศวกรในอุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมอากาศยาน เพื่อศึกษาการไหลภายในเครื่องยนต์ ประโยชน์ที่ได้รับก็คือได้ทราบถึงข้อมูลสำคัญของระบบหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง การเผาไหม้ และกระบวนการในการผสมผสานกันระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งข้อมูลสำคัญเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง การลดมลพิษ ที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์ และการลดระดับเสียงรบกวนของเครื่องยนต์ นอกจากนี้เทคนิค PIV ยังถูกนำไปใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับเปลวไฟ (เช่น การศึกษาเปลวไฟจากการเผาไหม้ของจรวดภายใต้สภาวะไร้น้ำหนัก) วิศวกรรมจรวด และการควบคุมก๊าซเสียจากการเผาไหม้

ทางด้านเครื่องจักรกลของไหล



รูปที่ ๔ การวัดความเร็วของอากาศในคอมเพรสเซอร์ของชุดกังหันก๊าซ

นักออกแบบเครื่องจักรกลของไหล (เช่น เครื่องยนต์ ปัม และกังหัน) พยายามที่จะหาโอกาสในการพัฒนาและปรับปรุงรายละเอียดปลีกย่อยของอุปกรณ์ของตนเองที่ได้ออกแบบและผลิตไปแล้วให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และเนื่องจากเทคนิค PIV เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลการไหลภายในของอุปกรณ์เหล่านี้ เพื่อให้ให้นักออกแบบเข้าใจและนำไปใช้ในการออกแบบ และปรับปรุงอุปกรณ์

เครื่องจักรกลของไหลเหล่านี้ งานออกแบบอุปกรณ์เครื่องจักรกลของไหลที่ใช้เทคนิค PIV ช่วยในการศึกษาข้อมูลการไหลภายในนั้นได้แก่เครื่องยนต์กังหันก๊าซ คอมเพรสเซอร์ ปั๊ม และเครื่องจักรกลที่ใช้ในระบบไฮดรอลิก

ทางด้านกระบวนการผสม

ในกระบวนการผลิตอาหาร ยารักษาโรค อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ ล้วนแล้วแต่ต้องอาศัยการผสมผสานกันระหว่างของแข็งและของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว ขั้นตอนเหล่านี้จะต้องมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ การผสมกันนั้นส่วนมากจะเป็นส่วนหนึ่งในห่วงโซ่การผลิต ซึ่งการทราบถึงรายละเอียดของกระบวนการผสมกันนั้นมีความสำคัญมาก เพื่อที่จะให้ได้มาซึ่งผลผลิตที่มีคุณภาพสูง เช่น ในกระบวนการผลิตวัสดุจำพวกโพลีเมอร์ ผู้ผลิตจะต้องทราบถึงความเร็ว อัตราการไหล การรวมตัวกันของสารแต่ละชนิด และสามารถควบคุมได้อย่างเที่ยงตรงแน่นอน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ดังนั้นเทคนิค PIV ก็ถูกนำมาใช้ในกระบวนการนี้

ทางด้านกระบวนการทางอุตสาหกรรม

วิศวกรทั้งในห้องทดลองและในโรงงานอุตสาหกรรมได้ใช้เทคนิค PIV ในการพัฒนาการไหลต่าง ๆ ที่มีอยู่ในกระบวนการต่าง ๆ ในวงการอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ประหยัดพลังงาน พัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากกระบวนการผลิต และการปกป้องสภาวะแวดล้อมจากของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิต เทคนิค PIV สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ในการศึกษาการไหลของโลหะที่หลอมละลายในกระบวนการพ่นโลหะที่อยู่ในสภาพของเหลว การผลิตผงโลหะ กระบวนการแยกองค์ประกอบของของไหล และกระบวนการเผาไหม้ในเตาเผา และหัวเผาต่าง ๆ

ทางการปรับอากาศภายในและการระบายอากาศ

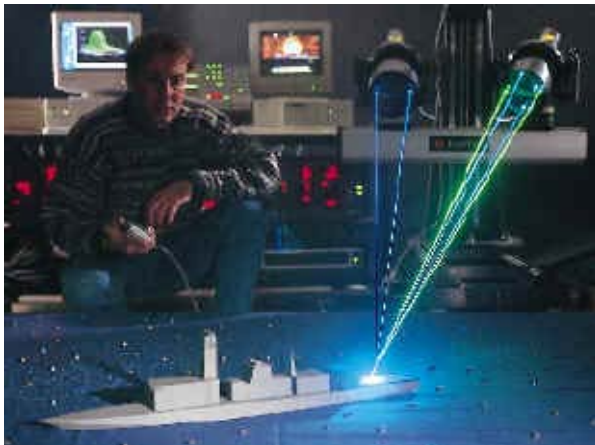
เทคนิค PIV ถูกนำไปใช้ในการศึกษาการเคลื่อนตัวของอากาศในห้องที่มีการระบายอากาศ ซึ่งการเคลื่อนตัวของอากาศนี้มีผลมาจากการไหลแบบบังคับ (ระบบระบายอากาศ) และการพาโดยธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้อง ซึ่งความรู้สึกสะดวกสบายของผู้อาศัยภายในห้องปรับอากาศนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศและสนามอุณหภูมิภายในห้อง ข้อมูลที่ได้จากเทคนิค PIV สามารถนำมาใช้ในการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบระบายอากาศได้

ทางการรักษาและป้องกันสิ่งแวดล้อม

ความเข้าใจอย่างลึกซึ้งซึ่งในกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลนั้นมีความสำคัญมากในเรื่องที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อม หนึ่งในนั้น ได้แก่ สถานที่ติดตั้งโรงไฟฟ้า และการติดตั้งสิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการระบายความร้อนเป็นจำนวนมาก การทำนายการไหลของของไหลรอบ ๆ บริเวณ

สิ่งปลูกสร้างเหล่านั้นได้อย่างแม่นยำค่อนข้างมีความสำคัญอย่างมาก ถ้าหากต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาสถานะแวดล้อม ดังนั้น การใช้เทคนิค PIV มาศึกษาการไหลของของไหลต่าง ๆ ที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้นมีความสำคัญในการหาวิธีการเพื่อนำมาใช้ปรับปรุงเพื่อให้กระบวนการเหล่านั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เช่น ในกระบวนการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้า ถ่านหินจะเกิดก๊าซที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการใช้เทคนิค PIV มาศึกษาการฉีดพ่นสารเคมีบางชนิดเพื่อไปทำปฏิกิริยากับก๊าซพิษดังกล่าว เพื่อให้เกิดเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบหัวฉีดเพื่อให้สารสองชนิดสามารถผสมกันและทำปฏิกิริยากันได้ดีที่สุด เพื่อลดปริมาณมลพิษที่จะถูกปล่อยออกไปสู่สิ่งแวดล้อม

ทางด้านโครงสร้างและอาคารต่าง ๆ



รูปที่ ๕ การศึกษาการไหลของอากาศบริเวณเหนือคาน้ำ
บรรทุกเฮลิคอปเตอร์

ในการออกแบบอาคารและโครงสร้างต่าง ๆ ที่ต้องตั้งอยู่บนพื้นดินและในทะเลจะต้องมีความเหมาะสมเพื่อให้สามารถทนทานต่อการกระทำของแรงลมและแรงคลื่นที่กระทำต่อตัวโครงสร้างและอาคาร เช่น การออกแบบอาคารสูง การออกแบบสะพาน และการออกแบบแท่นขุดเจาะน้ำมันในทะเล ดังนั้นเทคนิค PIV ก็จะเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการศึกษาการไหลของอากาศ น้ำบริเวณรอบตัวอาคารและโครงสร้างต่าง ๆ ได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ก็จะสามารถนำมาใช้ในการศึกษาแรงกระทำจากคลื่นลมได้

ทางการพ่นให้เป็นละอองของของเหลว

การพ่นให้เป็นละอองถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ อย่างมากมายนับไม่ถ้วนทั้งในกระบวนการอุตสาหกรรมและการผลิตสินค้าในทางการค้า ไม่ว่าจะเป็นวัตถุประสงค์จะเป็นเรื่องใดก็ตาม เช่น การทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดในระบบหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง การพ่นสี หรือการพ่นโลหะเพื่อเคลือบผิว สิ่งเหล่านี้จะต้องอาศัยการออกแบบหัวฉีดหรือหัวพ่นที่เหมาะสม ทั้งทางด้านการกระจายของละอองและขนาดของละอองของของเหลว ดังนั้น เทคนิค PIV สามารถใช้ในการพัฒนาและออกแบบหัวฉีดและหัวพ่นเหล่านี้

ทางการไหลในทางชีวภาพ

การศึกษาค้นคว้าและวิจัยในด้านของไหลชีวภาพกลายมาเป็นเรื่องที่มีความสนใจอย่างกว้างขวาง นักวิทยาศาสตร์พยายามที่จะทำความเข้าใจการไหลที่เกิดขึ้นในทางชีวภาพ การที่ได้ทราบ

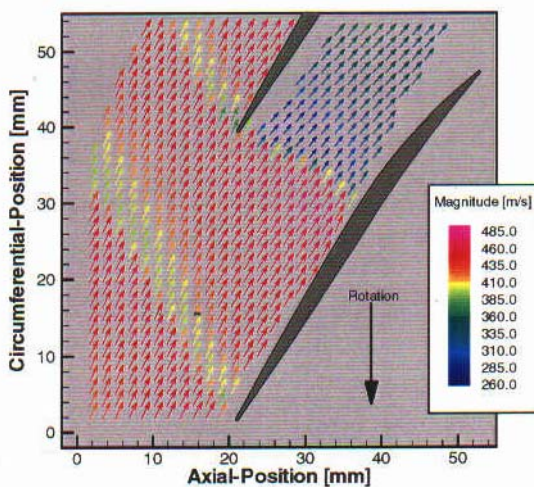
ข้อมูลและเข้าใจการไหลเหล่านี้จะนำมาซึ่งการพัฒนาขั้นตอนในการรักษาผู้ป่วยที่มีปัญหาในบางด้านได้ ซึ่งได้มีผู้นำเทคนิค PIV นี้ไปใช้ในการศึกษาการไหลของเลือดในหัวใจเทียม การไหลผ่านลิ้นหัวใจเทียม การไหลของอากาศในปอดและในระบบหายใจ

ตัวอย่างผลการทดลองที่ได้จากการใช้เทคนิค PIV

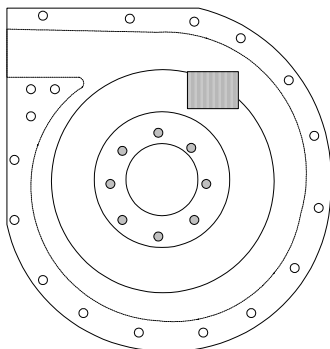
ในรูปที่ ๖ เป็นตัวอย่างของการวัดความเร็วของอากาศ ที่ไหลผ่านคอมเพรสเซอร์ของชุดกังหันก๊าซโดย Dr. Mark P Wernet^m โดยที่การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองเป็นไปตามรูปที่ ๔ ซึ่ง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นการไหลของอากาศภายใน

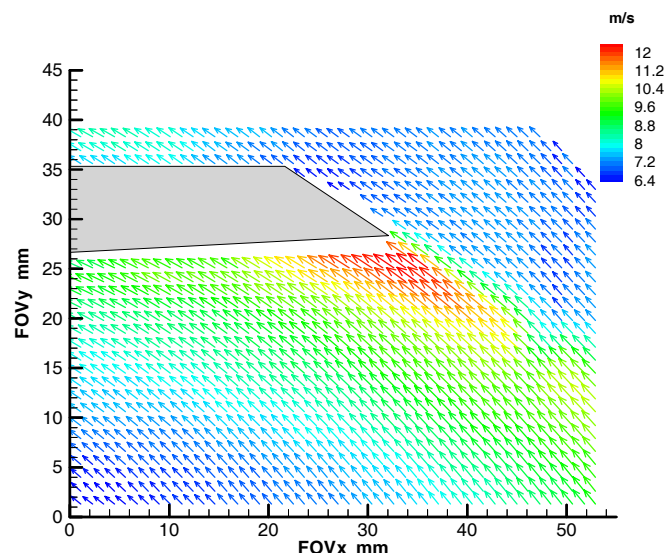
คอมเพรสเซอร์และยังพบว่าบริเวณช่องทางเข้าระหว่างครีบกังหันมี shock wave^m เกิดขึ้น และบริเวณส่วนขอบนำของครีบกังหันก็มีการเกิด bow wave^m โดยเห็นได้จากความเร็วของอากาศที่ลดลงที่ส่วนขอบนำของครีบกังหันและขยายออกไป นอกจากนี้ถ้าหากมีการทดลองศึกษาที่บริเวณครีบกังหันก็อาจจะได้ทราบการเกิด separation บนครีบกังหันได้ ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้มีส่วนสำคัญในการนำไปใช้ในการออกแบบ



รูปที่ ๖ ตัวอย่างผลการทดลองการวัดการไหลโดยเทคนิค PIV ในคอมเพรสเซอร์



รูปที่ ๗ แสดงตำแหน่งในการวัดการไหลโดยเทคนิค PIV ในปั๊มหอยโข่ง



รูปที่ ๘ แสดงผลการทดลองในการวัดการไหลโดยเทคนิค PIV ในปั๊มหอยโข่ง ณ ตำแหน่งใน

รูปที่ ๗ เป็นปั๊มชนิดหอยโข่งที่ใช้สำหรับการส่งถ่ายของเหลวและของแข็งที่ผสมกันอยู่ในลักษณะ ๒ สถานะ (Solid-liquid or slurry pump) ส่วนที่แรงเป็นสไลด์หอยโข่งเป็นตำแหน่งที่ได้ใช้เทคนิค PIV ในการวัดการไหลซึ่งผลการทดลองได้แสดงอยู่ในรูปที่ ๘ โดยในภาพจะเห็นปลายของใบพัดของปั๊ม กำลังหมุนผ่านพื้นที่ที่กำลังวัดการไหลและจะเห็นได้ว่าด้านดูด (suction side) ของใบพัดตรงส่วนปลายของไหลจะมีความเร็วสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ และที่บริเวณนี้มีโอกาสที่จะเกิด cavitation ได้สูงกว่าที่บริเวณอื่น

ดังที่กล่าวข้างต้น มีนักวิทยาศาสตร์ นักฟิสิกส์ และวิศวกร จำนวนมากนำเทคนิค PIV ไปใช้อย่างกว้างขวางและในปัจจุบันนี้ เทคนิค PIV ได้มีการพัฒนารูปแบบให้ง่ายต่อการใช้งานมีการแก้ไขปรับปรุงการคำนวณหาความเร็วให้มีความเที่ยงตรงสูงขึ้น ทำให้เทคนิค PIV เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพค่อนข้างสูงในการศึกษาการไหลของของไหลที่มีความซับซ้อน นอกจากนั้นยังมีการนำเทคนิค PIV ไปใช้ในการศึกษาการไหลอื่น ๆ อีกมากที่ผู้เขียนยังไม่ได้กล่าวถึง นับได้ว่าเทคนิค PIV มีประโยชน์ต่อวงการต่าง ๆ ได้อย่างมากโดยเฉพาะกับนักพลศาสตร์ของไหล ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าอีกไม่ช้า รอบ ๆ ตัวเราคงจะมีการใช้ประโยชน์จากเทคนิค PIV นี้กันอย่างแพร่หลาย

เอกสารอ้างอิง

๑. Adrian, R.J., “**Multi-Point Optical Measurements of Simultaneous Vectors in Unsteady Flow-A Review**”, Intl. J. Heat and Fluid, Vol.7, pp. 127-145, 1986
๒. Dantec, FlowMap : **Installation & User’s Guide**, 4 ed. Skovlunde, Denmark : Dantec. Measurement Technology, 1998
๓. Mahiwan, K. et al, “**PIV Investigations of Flow in a Centrifugal Slurry Pump**”, 9th. International Symposium on Flow Visualization, Scotland, 2000
๔. Reeves, M., Garner, J.C., Dent & Hallivell, N.A., “**Particle Image Velocimetry Analysis of IC Engine In-Cylinder Flows**”, Optics and Lasers in Engineering, Elsevier, Vol.25, pp.415-432, 1996.
๕. Wernet, M.P., “**Application of Digital Particle Imaging Velocimetry to Turbo Machinery**”, Planar Optical Measurement Methods for Gas Turbine Components, Cranfield, UK, September 16-17 and Cleveland, U.S.A., September 21-22, 1999