บทที่ 2
ความรู้พื้นฐาน

2.1 ลักษณะของการไหลในดิฟฟิวเซอร์

ในช่วงทศวรรษที่ 50 ในศตวรรษที่แล้ว Kline และเพื่อนร่วมงานได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการไหลในดิฟฟิวเซอร์และพบลักษณะการไหลในดิฟฟิวเซอร์ 4 ลักษณะตามแผนภูมิของลักษณะการไหลในรูปที่ 2.1 (Reneau et al., 1967) โดยแต่ละลักษณะการไหลมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 การไหลที่ไม่มีการแยกตัวออกจากผนัง (No appreciable stall regime)

การไหลลักษณะนี้จะพบในดิฟฟิวเซอร์ที่มีมุมรวมและมีค่า L/W_1 น้อย โดยอยู่ในบริเวณต่ำกว่าเส้น a-a ในแผนภูมิ แต่ถ้าความหนาของชั้นขอบเขตที่ทางเข้ามากอาจทำให้เกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังบ้าง การไหลในลักษณะนี้จะทำให้ความดันและรูปร่างของความเร็วมีความสมมาตรกับแกนกลางของดิฟฟิวเซอร์และมีลักษณะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา

2.1.2 การไหลที่มีการแยกตัวออกจากผนังแบบช่วงต่อ (Large transitory stall regime)

ดิฟฟิวเซอร์ที่เกิดการไหลลักษณะนี้ มีมุมรวมมากขึ้นจากดิฟฟิวเซอร์ในข้อ 2.1.1 โดยมีขนาดอยู่ระหว่างเส้น a-a และ b-b รูปแบบของการไหลไม่คงที่เพราะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของความเร็วอยู่ตลอดเวลา ตำแหน่งของการเกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังจะเคลื่อนที่ขึ้นลงบนผนังและสลับไปมาระหว่างผนังทั้ง 2 ข้างของดิฟฟิวเซอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันในดิฟฟิวเซอร์

2.1.3 การไหลที่มีการแยกตัวออกจากผนังแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully - developed stall regime)

ดิฟฟิวเซอร์ที่เกิดการไหลลักษณะนี้มีมุมรวมมากขึ้นจากข้อ 2.1.2 โดยมีขนาดอยู่ในช่วงเหนือเส้น b-b และอาจจะเลยขึ้นไปจนถึงเส้น c-c ในแผนภูมิ การไหลแยกตัวออกจากผนังจะเกิดใกล้กับบริเวณทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์ เป็นกลุ่มการไหลหมุนวนบนผนังเพียงข้างเดียวซึ่งจะขวางการไหลของ freestream และทำให้สมรรถนะของดิฟฟิวเซอร์ต่ำลง ถึงแม้ว่าการไหลแยกตัวนี้จะมีเสถียรภาพแต่ก็อาจจะมีการเคลื่อนที่สลับไปมาระหว่างผนังสองข้างได้ ถ้ามีการกวนการไหลที่ทางเข้าหรือที่ทางออกของดิฟฟิวเซอร์

2.1.4 การไหลที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบเจท (Jet flow regime)

ดิฟฟิวเซอร์ที่มีการไหลลักษณะนี้เป็นดิฟฟิวเซอร์ที่มีมุมรวมมากๆ ซึ่งมีขนาดอยู่เหนือเส้น c-c หรืออาจจะต่ำลงมาถึงเส้น d-d ในแผนภูมิ โดยมีการไหลแยกตัวบนผนังทั้งสองข้างขวาง freestream มีผลทำให้พื้นที่การไหลน้อยลงเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของดิฟฟิวเซอร์ทั้งหมด รูปร่างของความเร็วและความดันในเจทจะคงที่ ยกเว้นบริเวณ shear layer ที่ขอบของเจทซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2.2 แนวทางการควบคุมการไหลแยกตัวออกจากผนัง

การควบคุมไม่ให้เกิดการไหลแยกตัวออกจากผนัง มีด้วยกันหลายวิธีการซึ่งสามารถพบเห็นได้ในงานวิศวกรรม ตัวอย่างเช่น การใช้วอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์บนปีกเครื่องบินรบ เป็นต้น โดยตัวอย่างหนึ่งของการควบคุมการไหลในงานทางวิศวกรรมคือ วิธีการ suction ในรูปที่ 2.2 (Schlichting, 1968) ซึ่งเป็นการไหลแยกตัวในดิฟฟิวเซอร์ผนังโค้ง พบว่าเมื่อใช้วิธีการ suction แล้วบริเวณที่เกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังดิฟฟิวเซอร์จะลดลง แต่การควบคุมไม่ให้เกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังจะมีหลายวิธีการมากกว่าที่ได้กล่าวมา ซึ่ง Gad-el-Hak and Bushnell (1991) ได้ทำการรวบรวมแนวทางในการควบคุมการไหลแยกตัวออกจากผนัง ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละวิธีการดังต่อไปนี้

แนวทางแรกคือการใช้ turbulator ซึ่งเป็นการเพิ่มสภาวะความปั่นป่วนให้กับชั้นขอบเขตของการไหล ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมโดยความปั่นป่วนหรือทำให้ Reynolds stress ของการไหลเพิ่มมากขึ้น วิธีการที่ใช้เพื่อทำให้การไหลในชั้นขอบเขตมีสภาวะความปั่นป่วนมากขึ้นมีหลายวิธีการ เช่น การใช้ความหยาบของพื้นผิว, การใช้พื้นผิวที่เป็นลูกคลื่น, การสั่นสะเทือนของผนัง หรือการใช้ท่อทรงกระบอกวางขวางการไหล เป็นต้น

การจัด streamline เป็นอีกวิธีการที่สามารถลดการเกิด adverse pressure gradient ที่สูงเกินไป ทำให้สามารถชะลอหรือป้องกันการเกิด separation ได้ โดยอาจจะใช้ vane, slat หรือ flap เพื่อลด pressure gradient ลง ซึ่งวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการ blowing ได้

การถ่ายเทความร้อนเป็นอีกกระบวนการในการควบคุมการไหลแยกตัวออกจากผนัง โดยทำให้ของไหลถ่ายเทความร้อนไปผนังหรือผนังถ่ายเทความร้อนมาสู่ของไหล ตัวอย่างเช่น ถ้าผนังของการไหลถูกทำให้เย็นลง มวลของไหลที่อยู่ใกล้กับผนังจะมีความหนาแน่นมากขึ้น การที่ของไหลมีความหนาแน่นมากขึ้นนี้จะทำให้ของไหลในบริเวณใกล้กับผนังมีโมเมนตัมสูง ดังนั้นจะทำให้ลดการเกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังได้

การใช้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างผนังกับการไหล ซึ่งจะสามารถลดการขยายตัวของชั้นขอบเขตได้ เพราะของไหลที่อยู่ใกล้กับผนังจะได้รับโมเมนตัมจากผนังด้วย จากการศึกษาลักษณะการไหลที่มีความสม่ำเสมอผ่านทรงกระบอกที่มีการหมุน Prandtl (1925) พบว่าการเกิด

การไหลแยกตัวออกจากผนังบนผนังของทรงกระบอกด้านที่มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับ freestream จะหายไป และบนผนังอีกด้านหนึ่งซึ่งมีการเคลื่อนที่ของผนังสวนทางกับการไหล จะเกิดการไหลแยกตัวแบบไม่สมบูรณ์นัก

การเพิ่มโมเมนตัมให้กับการไหลใกล้กับบริเวณผนัง ซึ่งจะนำโมเมนตัมมาจากภายนอก ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ active (active control) หรือภายในการไหลซึ่งเป็นการควบคุมแบบ passive (passive control) โดยที่วิธีการ passive control เป็นเทคนิคที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก แต่จะต้องมีโมเมนตัมส่วนหนึ่งที่สูญเสียไปกับการเกิดแรงต้านที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นอาจจะทำให้การไหลเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบมาเป็นการไหลแบบปั่นป่วนด้วย ตัวอย่างเช่น การติดแถววอร์เทกซ์เจเนอเรเตอร์เพื่อเพิ่มระดับความเป็นเทอร์บูเลนท์และส่งผ่านโมเมนตัมไปสู่การไหลที่อยู่ใกล้กับผนัง การส่งผ่านโมเมนตัมอาจจะเกิดจากการเกิด streamwise vortex ที่การไหลมีโมเมนตัมสูงและมีการเคลื่อนที่เป็นลักษณะเกลียว จะทำให้เกิดการหมุนวนไปผสมและแทนที่มวลของของไหลที่มีโมเมนตัมต่ำในชั้นขอบเขต และวอร์เทกซ์จะทำให้เสถียรภาพของการไหลเพิ่มขึ้น แล้วยังทำให้ค่า Reynolds stress ของการไหลเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมในทิศตั้งฉากกับการไหลเพิ่มมากขึ้น

นอกจากวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้ว จะมีวิธีการในการควบคุมการเกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังอีกหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การใช้ช่องเพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของ freestream เข้าสู่บริเวณชั้นขอบเขต, การใช้ discrete jet injection เพื่อทำให้เกิด streamwise vortex หรือการใช้ wall jet ซึ่งประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ blowing แบบธรรมดา หรือการใช้คลื่นเสียงที่เรียกว่า "Acoustic excitation" โดยใช้ความถี่และความเข้มของคลื่นเสียงที่เฉพาะค่าหนึ่ง ซึ่งสามารถเพิ่มการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่าง freestream และการไหลในชั้นขอบเขตได้

2.3 พลังงานสูญเสียในดิฟฟิวเซอร์

สมการที่แสดงความสัมพันธ์พื้นฐานของสัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิต C_p (Static pressure recovery coefficient) และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันรวม K (Total pressure loss coefficient) คือ

$$K = C_{p_i} - C_p \qquad (2.3.1)$$

โดย K คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันรวม, C_{p_i} คือค่าสัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิตอุดมคติซึ่งมีค่าเท่ากับ $1-(1/AR)^2$ โดย AR คือค่าอัตราส่วนของพื้นที่ทางออกต่อพื้นที่ทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์ และค่า C_p คือสัมประสิทธิ์การฟื้นความดันสถิตที่เกิดขึ้นจริงของดิฟฟิวเซอร์ ซึ่งวิศวกรจะนิยมใช้สมการนี้มากเพราะสะดวกในการใช้งาน โดยมีสมมติฐานว่าการไหลมีความ

สม่ำเสมอทั้งหน้าตัดทางเข้าและทางออกของดิฟฟิวเซอร์ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงการไหลในงานทางวิศวกรรมมักจะมีความไม่สม่ำเสมอเกิดขึ้น ดังนั้นการคำนวณหาการสูญเสียจึงต้องคำนึงถึงความไม่สม่ำเสมอนี้ด้วย ในงานนี้การคำนวณการสูญเสียสามารถทำได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุม CV (Control volume) ในรูปที่ 2.3 และจากสมมติฐานของการไหลว่า การไหลในดิฟฟิวเซอร์เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady flow) และอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow) สามารถเขียนสมการพลังงานได้เป็นดังนี้

$$\dot{Q} + \dot{W}_s + \dot{W}_{shear} + \dot{W}_{other} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{cv} \rho e dV + \int_s (e + Pv)\,\rho \vec{V}.d\vec{A} \qquad (2.3.2)$$

โดยที่ $\dot{Q}$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยเวลา (วัตต์)

$\dot{W}_S$ คือกำลังจาก shaft (วัตต์)

$\dot{W}_{shear}$ คืองานของ shear ต่อหน่วยเวลา (วัตต์)

$\dot{W}_{other}$ คืองานอื่นๆที่ทำกับระบบต่อหน่วยเวลา (วัตต์)

e คือ energy per unit mass = $u + 1/2V^2 + gz$

P คือความดันสถิต

v คือ specific volume

ρ คือความหนาแน่น

u คือ Internal energy ต่อหน่วยมวล

V คืออัตราเร็ว

gz คือพลังงานศักย์ต่อหน่วยมวล

เนื่องจาก $\dot{W}_{shear}$ มีค่าน้อย และไม่มีงานใส่เข้าในดิฟฟิวเซอร์ทำให้ $\dot{W}_{shear}$, $\dot{W}_S$ และ $\dot{W}_{other}$ ประมาณเท่ากับศูนย์ และด้วยสมมติฐานว่าการไหลเป็น steady flow ทำให้เทอม $\frac{\partial}{\partial t}\int_{cv} \rho e\, dV$ เท่ากับศูนย์ด้วย ดังนั้นสมการพลังงานจะลดรูปเป็น

$$\dot{Q} = \int_s (e + Pv)\rho \vec{V}\, d\vec{A}$$

เนื่องจากพลังงาน e เท่ากับผลรวมของพลังงานภายใน พลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ และ $d\dot{m} = \rho \vec{V}\, d\vec{A}$ เมื่อแทนค่าทำให้สมการพลังงานเป็น

$$\dot{Q} = \int_s (u + \frac{1}{2}V^2 + gz + Pv)d\dot{m}$$

$$\dot{Q} - \int_{cs} u d\dot{m} = \int_{cs} \frac{1}{\rho}(\frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g z + P) d\dot{m}$$

เทอม $\dot{Q} - \int_{cs} u d\dot{m}$ เป็นพลังงานรวมที่สูญเสียไป ($\dot{P}_{Loss}$) เมื่อไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ และเทอม $\int_{cs} g z d\dot{m}$ ของทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากทางเข้า ดังนั้นสามารถเขียนสมการพลังงานได้เป็น

$$\dot{P}_{Loss} = \int_{cs} \frac{1}{\rho}(\frac{1}{2}\rho V^2 + P)\, d\dot{m}$$

ทำการหารด้วยค่า $\dot{m}$ ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\frac{\dot{P}_{Loss}}{\dot{m}} = \frac{1}{\dot{m}} \int_{cs} \frac{1}{\rho}(\frac{1}{2}\rho V^2 + P)\, d\dot{m}$$

เนื่องจากความดันรวม $P_T = P + \frac{1}{2}\rho V^2$ ทำให้

$$\frac{\dot{P}_{Loss}}{\dot{m}} = \frac{1}{\dot{m}} \int_{cs} \frac{1}{\rho}(P_T)\, d\dot{m}$$

ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียไปต่อหน่วยมวลเท่ากับ

$$\frac{\dot{P}_{Loss}}{\dot{m}} = \frac{1}{\rho}(\overline{P}_{T2} - \overline{P}_{T1}) \qquad (2.3.3)$$

โดย ($\bar{}$) แทนค่า mass averaged สำหรับ subscript *1* แทนที่ทางเข้าและ 2 แทนที่ทางออก ถ้าทำการนิยามค่า *K* เป็นพลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยมวลและ *normalized* โดยใช้ค่า *mass averaged* ของพลังงานจลน์ต่อหน่วยมวลที่ทางเข้าดิฟฟิวเซอร์ ดังนั้นสมการ (2.3.3) จะเขียนได้เป็น

$$K = \frac{\dot{P}_{Loss} / \dot{m}}{1/2\, \overline{V}_1^2} = \frac{(\overline{P}_{T2} - \overline{P}_{T1})}{1/2\rho \overline{V}_1^2} = \frac{(\overline{P}_{T2} - \overline{P}_{T1})}{(\overline{P}_{T1} - \overline{P})}$$

หรือ

$$K = \frac{(\overline{P}_{T2} - \overline{P}_{T1})}{\overline{q}_1} \qquad (2.3.4)$$

โดย q แทนค่าความดันจลน์ ซึ่งสมการ (2.3.4) เป็นสมการที่นิยามการสูญเสียอย่างถูกต้อง

2.4 การไหลผ่านปีกแบบสามเหลี่ยม

การไหลผ่านปีกสามเหลี่ยม (Delta wing) ที่มีมุมปะทะกับการไหลจะเกิดวอร์เทกซ์ขนาดใหญ่ 2 อัน ที่เกิดจากการไหลแยกตัวบนขอบด้านหน้าของปีก โดยปรากฏการณ์ของการเกิดวอร์เทกซ์บนปีกสามเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 2.4 (Menke and Gursul, 1997) เมื่อการไหลผ่านขอบด้านหน้าของปีก (Leading edge) ด้วยมุมปะทะเท่ากับ α การไหลจะแยกตัวออกจากผิวตลอดขอบของปีกทำให้เกิดเป็น shear layer ที่ม้วนตัวขึ้นในลักษณะของเกลียวเกิดเป็น primary vortex ซึ่งการม้วนตัวของ shear layer นี้จะมีผลทำให้เกิดการม้วนตัวในทิศทางตรงกันข้ามของ shear layer ทางด้านบนของปีกเกิดเป็น secondary vortex ขนาดเล็กอยู่คู่กับ primary vortex ขนาดใหญ่ทั้งสองด้าน

เมื่อปีกแบบสามเหลี่ยมมีมุมปะทะกับการไหลมากขึ้น วอร์เทกซ์ที่เกิดบนขอบของปีกจะขยายขนาดออกและความเร็วตามทิศการไหลจะลดลงอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสลายตัวของวอร์เทกซ์ (Vortex burst หรือ Vortex breakdown) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (Lambourne and Bryer, 1961) พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดการสลายตัวของวอร์เทกซ์มีอยู่หลายตัวด้วยกัน เช่น มุมปะทะ (Angle of attack), มุมsweepback, ลักษณะรูปร่างของขอบด้านหน้าและด้านหลังของปีกสามเหลี่ยม, เรโนลด์นัมเบอร์, มัคนัมเบอร์ และสภาวะความปั่นป่วนของการไหล เป็นต้น

จากการทดลองของ Harvey (1958) พบว่ามุมปะทะ, มุม sweepback และมุม yaw ของปีกสามเหลี่ยม มีผลต่อเสถียรภาพของวอร์เทกซ์ด้วยกลไกที่คล้ายคลึงกันคือ ถ้าเพิ่มมุมปะทะหรือลดค่ามุม sweepback หรือเพิ่มมุม yaw ขึ้นจะสามารถเพิ่มความเร็วของการไหลหมุนวนของวอร์เทกซ์และทำให้ความเร็วของการไหลตามแนวแกนลดลง ทำให้เกิดการสลายตัวของวอร์เทกซ์เร็วขึ้น Sforza et al. (1978) ได้ทำการทดลองวัดความเร็วของการไหลบนปีกสามเหลี่ยมที่มีมุม sweepback เท่ากับ 75 องศา พบว่าความเร็วของการไหลหมุนวนจะเพิ่มขึ้นถ้าทำการเพิ่มมุมปะทะของปีกสามเหลี่ยม และถ้าเป็นการไหลของวอร์เทกซ์ในบริเวณที่มี adverse pressure gradient สูงก็จะทำให้เกิดการสลายตัวของวอร์เทกซ์เร็วขึ้น

Wentz (1972) พบว่ารูปร่างของขอบด้านหน้าของปีกสามเหลี่ยมจะมีผลต่อการเกิดวอร์เทกซ์ โดยปีกสามเหลี่ยมที่มีลักษณะโค้งด้านบนจะสามารถลดการเกิดการไหลแยกตัวออก

จากผนังได้ เพราะสามารถลด adverse pressure gradient ของการไหลลง และลักษณะรูปร่างของขอบด้านหลังของปีกแบบสามเหลี่ยมจะไม่มีผลต่อตำแหน่งของการเกิดการสลายตัวของวอร์เทกซ์ เพราะขอบด้านหลังจะไม่มีผลต่อ vorticity balance ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การเกิดการไหลแยกตัวออกจากผนังเปลี่ยนแปลงไป

Elle (1961) ได้ศึกษาการไหลของน้ำและอากาศผ่านปีกสามเหลี่ยม พบว่าตำแหน่งของการเกิดวอร์เทกซ์จะไม่ขึ้นกับเรโนลด์นัมเบอร์ Lambourne and Bryer (1961) ไม่พบผลของการกวนการไหลใน freestream ต่อลักษณะของวอร์เทกซ์ที่เกิดขึ้นบนปีกแบบสามเหลี่ยม แต่ Lee et al. (1987) พบว่าตำแหน่งของการเกิดการสลายตัวของวอร์เทกซ์จะเปลี่ยนแปลงไป ถ้าความเป็นเทอร์บูเลนท์ของการไหลเพิ่มมากขึ้นจาก 0.5 เป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย