การคำนวณ Norminal Wake Field ที่ท้ายใบจักรเรือ จากข้อมูลการทดลอง Oblique-flow Simulation

น.อ.ผศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

ระหว่างปี พุทธศักราช ๒๕๓๕–๒๕๓๗ ขณะที่ผู้เขียนศึกษาและดูงานอยู่ที่ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์การต่อเรือของสาธารณรัฐประชาชนจีน (China Ship Scientific Research Center; CSSRC) ได้มีโอกาสเก็บข้อมูลการทดลองหาสนามความเร็วของกระแสน้ำบริเวณที่เกิด Wake แบบ Norminal Wake บนระนาบเอียงด้านท้ายเรือจำลองรหัส F25T ซึ่งเป็นแบบจำลองเรือฟริเกตขนาด ๒,๕๐๐ ตัน ที่พัฒนามาจากเรือชั้นเจียงหูของ กองทัพเรือสาธารณรัฐประชาชนจีน การทดลองกระทำในอุโมงค์ทดลองคาวิเตชั่น (Cavitation Tunnel) ด้วยความเร็วการไหล 3.0 m/s การทดลองในลักษณะนี้จัดว่าเป็นการทดลองแบบ “Oblique-flow Simulation” เนื่องจากเพลาใบจักรของเรือลาดเอียงทำมุมกับแนวไหลของน้ำประมาณ ๗ องศา

ความหมายเชิงรูปธรรมของสนามการไหลแบบ Wake ไม่ชัดเจนนัก ส่วนใหญ่มักอธิบายในรูปสมการคณิตศาสตร์ ในที่นี้ขออธิบายกว้าง ๆ ว่าสนามการไหลแบบเกิด Wake เป็นบริเวณที่การไหลไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงพบได้ทั่วไป เช่น ในท่อ เครื่องสูบน้ำ ด้านข้างตัวเรือ ใต้ท้องเรือ และท้ายใบจักร ... ฯลฯ เป็นต้น คำว่าไม่สม่ำเสมอในเรื่องการไหลมีความหมายกว้างมาก เช่น ถ้าเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคสับสนปนเปก็เรียกว่าไม่สม่ำเสมอ หรือถ้าอัตราการไหลตรงจุดต่าง ๆ ไม่เท่ากันก็เรียกว่าไม่สม่ำเสมอ ในประเด็นของพลศาสตร์การเคลื่อนที่เราทราบดีว่าขนาดของแรงสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่มีทิศทางและความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นตัวแปรสำคัญ ซึ่งในทางวิศวกรรมเกี่ยวกับเรือมักแสดงความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวในเทอมความแตกต่างความเร็วการไหลของแต่ละระนาบต่างกัน ๓ ลักษณะ ดังนี้

๑. Velocity Ratio Method ใช้อัตราส่วนระหว่างความเร็วเรือ (V_S) กับความเร็วการไหล ณ จุดต่าง ๆ อธิบายความไม่สม่ำเสมอของสนามการไหลโดยตรง

๒. Taylor’s Method (ที่มาของคำว่า “Wake”) Taylor[1] ใช้อัตราส่วนเรียกว่า “Wake Fraction” ซึ่งเป็นอัตราส่วนบ่งการสูญเสีย ความเร็วการไหลตามแกน (Axial Velocity; V_a) เทียบกับความเร็วของอนุภาคในสนามการไหลโดยรอบที่อยู่ไกลออกไป ซึ่งก็คือความเร็วของเรือ (V_S) อธิบายความไม่สม่ำเสมอของสนามการไหล ในรูปสมการ ดังนี้

$$w_T = \frac{V_S - V_a}{V_S} = 1 - \left(\frac{V_a}{V_S}\right) \qquad (๑)$$

๓. Froude Method ใช้อัตราส่วนที่มีรูปคล้าย Wake Fraction ของ Taylor แต่เทียบกับความเร็วของอนุภาคตรงจุดต่าง ๆ มีรูปสมการเป็น ดังนี้

$$w_F = \frac{V_S - V_a}{V_a} = \left(\frac{V_a}{V_S}\right) - 1 \qquad (๒)$$

จากสมการที่ (๑) และ (๒) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Wake Fraction ของ Taylor กับ Froude คือ

$$w_F = \frac{w_T}{1 - w_T} \quad \text{และ} \quad w_T = \frac{w_F}{1 + w_F} \qquad (๓)$$

ห้องทดลองวิศวกรรมต่อเรือทั่วไปนิยมอธิบายความไม่สม่ำเสมอของสนามการไหลด้วย Wake Fraction ของ Taylor และคำนวณค่าเฉลี่ย Wake Fraction ของระนาบท้ายใบจักรด้วยการอินทิเกรตเชิงปริมาตร (Volumetric Integration) ดังนี้

$$\overline{w} = \frac{\int_{rh}^{R} (w \cdot r) dr}{\int_{rh}^{R} r dr} \qquad (๔)$$

โดย rh = รัศมีดุม (Hub) ใบจักร
R = รัศมีระนาบที่ศึกษา
w = Wake Fraction ที่ระยะรัศมีใด ๆ

Wake ในสนามการไหลท้ายเรือเป็นข้อมูลสำคัญประการหนึ่งในการออกแบบใบจักรและคำนวณพลังขับเคลื่อนเรือ น้ำที่ผ่านข้างเรือขณะเรือเคลื่อนที่จะได้รับอิทธิพลจากความฝืดระหว่างตัวเรือและอุปสรรคต่างๆ ทำให้หลายแห่งมีความเร็วและทิศทางต่างไปจากกระแสน้ำที่เข้าหาตัวเรือ เกิดสนามการไหลแบบ Wake ที่มีความซับซ้อน แยกเป็น ๓ องค์ประกอบใหญ่คือ Tangential Wake, Radial Wake และ Axial Wake การวัดการไหล ๒ ลักษณะแรกต้องใช้เครื่องมือทดลองและเทคนิคพิเศษต่างจากการทดลองธรรมดา หรือทำนายจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะจำเพาะ จากการศึกษาทั่วไปพบว่า ๒ องค์ประกอบแรกมีค่าน้อยจนไม่นำมาคิดได้ ดังนั้น Axial Wake (ความเร็วเฉลี่ยของน้ำที่ไหลเข้าใบจักร) จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่พิจารณา ค่าเฉลี่ยความเร็วการไหลตามแกนเข้าสู่ใบจักรเรียกว่าเป็น “Speed of Advance” นิยมใช้สัญลักษณ์ $"V_A"$ ส่วนความเร็วของน้ำที่ไหลเข้าหาตัวเรือคือความเร็วของเรือขณะนั้น นิยมใช้สัญลักษณ์ $"V_S"$ ดังนั้นค่า Wake Fraction ของ Taylor จึงมีสมการเป็น ดังนี้

$$w = \frac{V_S - V_A}{V_S} \qquad (๕)$$

การหาค่า Wake Fraction บนระนาบท้ายใบจักรจำลองยุ่งยากพอสมควร โดยเฉพาะเมื่อพื้นที่ในช่องทดลอง (Test Section) ของอุโมงค์คาวิเตชั่นมีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถทดลองเท่าขนาดจริง (Full Scale Test) ได้ ปัญหาอีกประการหนึ่งคือเครื่องมือวัดมักไปรบกวนการไหลและการทำงานของใบจักร ปัจจุบันจึงนำเทคโนโลยีเลเซอร์ เช่น Laser Doppler Velocimetry (LDV) มาใช้ ทำให้สามารถวัดสนามการไหลแบบ Effective Wake ซึ่งหมายถึงสนามการไหลขณะใบจักรจำลองทำงาน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยี LDV มีข้อจำกัดเรื่องราคาและการนำมาประยุกต์กับเครื่องมือทดลองเดิม การทดลองเกี่ยวกับการไหล ทั่วไปจึงยังนิยมใช้เทคนิคดั้งเดิม คือวัดความเร็วของกระแสน้ำ Wake ตรงระนาบท้ายเรือบริเวณเดียวกับที่ใบจักรทำงาน (ไม่มีใบจักร) สนามความเร็วในลักษณะนี้เรียกว่าเป็น “Norminal Wake” แล้วนำไปหาความสัมพันธ์กับข้อมูลการทดลอง Self-propulsion Test และ Open-water Test เพื่อหารูปร่างท้ายเรือที่เหมาะสมกับพลังขับเคลื่อนและใบจักรต่อไป

เทคนิคการวัดดั้งเดิมดังกล่าวคือวัดแรงดันแบบ Total Pressure และ Static Pressure ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนระนาบด้วยเครื่องวัดอย่างง่ายที่เรียกว่า Pitot Tube (ดูรูปที่ ๑) ซึ่งทำงานตามหลักการของ Bernoulli โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงดัน ดังนี้

$$\Delta P = P_t - P_s = \frac{1}{2}\rho V^2 \qquad (๖)$$

P_t = Total Pressure

P_s = Static Pressure

ρ = ความหนาแน่นมวลของน้ำ

V = ความเร็วของอนุภาค

สมการที่ (๖) บ่งว่าเราสามารถคำนวณความเร็วของอนุภาคน้ำที่จุดใด ๆ ได้จากค่า Total Pressure และ Static Pressure ตรงจุดนั้น เมื่อประกอบกับแฟกเตอร์ปรับแก้ (Calibration Factor; ζ) ของ Pitot Tube แต่ละแห่ง (ดูตารางที่ ๑) จะคำนวณความเร็ว Speed of Advance ได้ดังนี้

$$V_A = \zeta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \qquad (๗)$$

r	ζ	r/R
130	1.036	0.145454
105	1.038	0.763636
55	1.033	0.40

ตารางที่ 1 แฟกเตอร์ปรับแก้ของ Pitot Tube

รูปที่ ๑

รูปที่ ๒

รูปที่ ๓ ภาพสเก็ตอย่างง่ายของการติดตั้ง Pitot Tube ในการทดลอง

การคำนวณหาสนามความเร็วของกระแสน้ำ Wake ทั้งระนาบจำต้องวัดแรงดันหลายจุดตามแนวรัศมีพร้อมกัน จึงติดตั้ง Pitot Tube ลักษณะเป็นชุด (ดูรูปที่ ๒) ที่ระยะ r จากแกนเพลาเท่ากับ ๕๕ มม. ๑๐๕ มม. และ ๑๓๐ มม. ตามลำดับ โดยกำหนดให้ระนาบกลมที่แทนใบจักร (ระนาบ A) มีขนาดเท่ากับใบจักร (R = ๑๓๗.๕๐ มม.) ทำให้อัตราส่วน r/R มีค่าเป็น ๐.๔, ๐.๗๖๓๖๓๖ และ ๐.๙๔๕๔๕๔ ตามลำดับ นอกจากนั้นยังใช้แผ่นกระดานบางวางในแนวระดับเหนือระนาบดังกล่าวเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมของท้องเรือบริเวณท้ายเรือนั้น เนื่องจากขนาดแรงดันที่วัดได้ส่วนใหญ่มีค่าน้อย จึงต้องขยายให้สูงขึ้นและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำไปประมวลได้ง่าย ดังนั้นต้องแปลงกลับไปมาด้วยแฟกเตอร์ Pressure-Voltage Conversion (Ct) ซึ่งมักปรับตั้งได้ที่เครื่องขยายสัญญาน (Amplifier) โดยในการทดลองได้ปรับแต่งแฟกเตอร์ดังกล่าวไว้ 14,700 Pascal/Volt และน้ำในอุโมงค์ทดลองมีความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 kg./m^3 จึงเขียนสมการที่ (๗) ได้ใหม่ ดังนี้

$$V_A = \zeta \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot 14{,}700}{1{,}000}} \qquad (๘)$$

ตารางที่ ๒ เป็นข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจาก Pressure Transducer ที่ถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์ โดย P1 และ P2 คือขนาดของ Total Pressure และ Static Pressure ตามลำดับ

ตารางที่ ๒

จากสมการที่ (๕) และ (๘) สามารถคำนวณและพล๊อต Wake Distribution ของจุดต่าง ๆ บนระนาบได้ดังตารางที่ ๓ และรูปที่ ๔ ตามลำดับ

ตารางที่ ๓

รูปที่ ๔ การกระจายของ Wake ในระนาบที่ศึกษา

ต่อไปนำค่า Wake Fraction ของจุดต่าง ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ย Wake Fraction ของระนาบด้วยการอินทิเกรตเชิงปริมาตรดังสมการที่ (๔) คือ

$$\overline{w}(r,\theta)=\frac{\int_0^{2\pi} w(r,\theta)rd\theta}{\int_0^{2\pi} rd\theta}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} w(r,\theta)d\theta \qquad (๙)$$

การอินทิเกรตสมการที่ (๙) จะอาศัยเทคนิคการอินทิเกรตของ Simpson แบบต่าง ๆ ที่นักเรียนนายเรือส่วนใหญ่คุ้นเคยดี ดังนั้นคำนวณค่าเฉลี่ยของ Norminal Wake Fraction ในระนาบที่ศึกษาได้ดังนี้

$$\overline{w}'(r,\theta)=\frac{\int_0^{2\pi}\int_{rh}^{R} w(r,\theta)rdrd\theta}{\int_0^{2\pi}\int_0^{R} rdrd\theta} \qquad (๑๐)$$

โดย ***rh*** คือรัศมีดุมใบจักรจำลองซึ่งมีขนาดเท่ากับ ๓๐ มม. ผู้เขียนจะไม่แสดงวิธีการคำนวณสมการที่ (๑๐) แต่จะแสดงผลการคำนวณและพล๊อตการกระจาย Wake Fraction ในตารางที่ ๔ และรูปที่ ๕ เห็นได้ว่าบริเวณส่วนบนของกราฟในช่วงมุมระหว่าง ๑๕๐ องศา ถึง ๒๑๐ องศา ที่ซึ่งใบจักรทำงานใกล้กับตัวเรือนั้นกระแส Wake จะแปรปรวนมาก สิ่งนี้อธิบายว่าทำไมต้องวัดค่าแรงดันในบริเวณนั้นใกล้ ๆ กัน (ทุก ๆ ๑๐ องศา)

ระยะ	r/R	ค่าเฉลี่ยของ Norminal Wake Fraction
130	0.945454	0.1930
105	0.763636	0.1944
55	0.4	0.2113

ตารางที่ ๔

รูปที่ ๕

ค่าเฉลี่ย Wake Fraction แต่ละ r/R จะถูกนำไปหาค่าเฉลี่ยของทั้งระนาบด้วยวิธีการเช่นเดียวกัน ซึ่งได้ค่าเฉลี่ย Wake Fraction บนระนาบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ๑๒๐ มม. ๑๐๕ มม. และ ๕๕ มม. เท่ากับ ๐.๑๕๙๙๗, ๐.๑๕๑๙๒๖ และ ๐.๑๐๕๖๕ ตามลำดับ ในการนำผลการคำนวณที่ได้จากข้อมูลการทดลองใบจักรจำลองเช่นนี้ไปอธิบายการไหลของสนามจริงจำต้องอาศัยกฎการเปรียบเทียบที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เรือใบจักรเดียว (Single-screw Ship) อาจใช้วิธีการที่แนะนำโดย Sasajima et al.[2] หรือที่พัฒนาให้ดีขึ้นโดย Hoekstra[3] ผู้เขียนจะนำวิธีประมาณค่า Wake Fraction บางวิธีมาเสนอในโอกาสต่อไป

ผู้เขียนหวังว่าบทความนี้จะให้ความรู้เกี่ยวกับสนามความเร็วการไหลที่บริเวณท้ายเรือและทราบที่มาและเทคนิคการหาค่าเฉลี่ย Wake Fraction จากข้อมูลการทดลองด้วยแบบจำลอง วัตถุประสงค์อีกประการที่นำข้อมูลจากการทดลองมาแสดงขั้นตอนการคำนวณและวิเคราะห์ในรูปบทความเช่นนี้ คืออยากให้ผู้อ่านโดยเฉพาะนักเรียนนายเรือมองเห็นภาพน้อยนิดของการดำเนินงานวิจัย เนื่องจากหลายคนมีความสับสนในเรื่องโครงงาน (Project) และบทความวิชาการที่นำมาเผยแพร่แต่เรียกว่างานวิจัย ซึ่งหลายท่านวิจารณ์ว่าน่าจะเรียกว่าเป็นการนำข้อมูลการทำงานมาสรุปอย่างเป็นระบบมากกว่า เห็นได้ว่าผู้เขียนเองไม่กล้าเรียกบทความวิชาการเช่นนี้ของผู้เขียนว่าเป็นงานวิจัย ถึงแม้สามารถแต่งเติมโดยนำศัพท์วิชาการงานวิจัยมาใช้เยอะ ๆ และจัดลำดับนำเสนอให้เห็นว่ามีรูปแบบครบถ้วนตามกระบวนการวิจัยได้ก็ตาม

บรรณานุกรม

๑. Taylor, D.W. **Speed and Power of Ships,** 1933.

๒. Sasajima, H., Tananka, I., Suzuki, T. **Wake distribution of full ships.** J.Soc. Nav. Arch., Japan, 120, 1966.

๓. Hoekstra, **M.Prediction of full scale wake characteristics based on model wake survey,** Int. Shipbuilding, Prog. No.250, June 1975

๔. เอกสารประกอบการสอนวิชาความต้านทานและพลังขับเคลื่อนเรือ โดย น.อ.ผศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง, กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ, โรงเรียนนายเรือ