

การทดลองเอียงเรือ (Inclining Experiments)

โดย น.น.ศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

ผู้อ่านหลายท่านอาจไม่ทราบว่าเรือทุกลำต้องนำไปทดลองเอียงเพื่อหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of Gravity) ที่แท้จริงของเรือ การทดลองเอียงเรือเป็นกิจกรรมที่ผู้ปฏิบัติงานและเกี่ยวข้องกับเรือควรทราบ ดังนั้นจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่จัดให้มีการเรียนการสอนในโรงเรียนนายเรือทั้งเนื้อหาที่เป็นทฤษฎีและในห้องปฏิบัติการ วัตถุประสงค์ของผู้เขียนที่นำเรื่องนี้มาเสนอเพื่อต้องการให้ประจักษ์ว่านักเรียนนายเรือได้รับการศึกษาเฉพาะทางที่สอดคล้องกับวิชาชีพของตนในอนาคตอย่างแท้จริงและความรู้พื้นฐานแม้เพียงเล็กน้อยที่ได้รับการศึกษาจากโรงเรียนนายเรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์แก่ราชนาวีและสังคมทั่วไปได้อย่างมาก

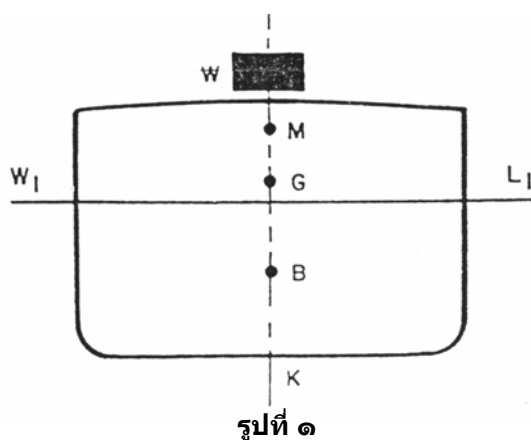
การทดลองเอียงเรือต้องการความร่วมมือจากหลายฝ่าย เพราะต้องจัดเตรียมสถานที่บนเรือ และเตรียมการล่วงหน้าในเรือพอสมควร โดยปกติแล้วจะทดลองเอียงเรือในวันที่อากาศสดใสบริเวณใกล้ท่าเรือหรือในอ่างน้ำของเรือที่ซึ่งกระแสลมและกระแสน้ำค่อนข้างสงบ นอกจากวิธีการทดลองเอียงเรือ ที่จะกล่าวถึงในวารสารฉบับนี้แล้ว ยังมีวิธีการอื่นที่น่าสนใจอีก เช่น การประมาณความสูงศูนย์เสถียรด้วยสูตรสำเร็จและการทดลองเอียงเรือด้วยการโคลงเรือ (Sallying Ship) ที่ดำเนินการโดยกำลังพลของเรือได้ทุกขณะ ผู้เขียนตั้งใจจะนำรายละเอียดของทั้งสองวิธีมาเขียนลงในวารสารฉบับต่อ ๆ ไป

ทำไมต้องทดลองเอียงเรือ ?

การทดลองเอียงเรือมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากในการประเมินความสามารถในการทรงตัวของเรือ และวัตถุลอยน้ำตามเกณฑ์บังคับสากลจะต้องทราบระยะความสูงศูนย์เสถียรของเรือ (Metacentric Height ; $\overline{GM}$) เรือทุกลำจะต้องมีระยะความสูงดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดมิฉะนั้นจะถือว่าไม่ปลอดภัยและไม่สามารถออกเดินทางได้ การใช้งานเรือและวัตถุลอยน้ำเชิงพาณิชย์ทั่วโลกมีการตรวจสอบและประเมินเช่นนี้มาโดยตลอด แม้กระทั่งกองทัพเรือสหรัฐอเมริกา ยังได้ออกเกณฑ์ตรวจสอบความปลอดภัยด้านการทรงตัวสำหรับเรือของตนที่เรียกว่า "U.S.Navy Criteria" ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเรือทั่วไปได้เช่นกัน ส่วนกองทัพเรือไทยและกองทัพเรืออื่น ๆ หรือแม้กระทั่งในระดับชาติของหลายประเทศ ส่วนใหญ่ยังไม่มีเกณฑ์การตรวจสอบและประเมินการทรงตัวของตน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่เรือรบมักถูกออกแบบให้มีความสามารถในการทรงตัว และสมรรถนะสูงสุดอยู่แล้วจึงไม่เห็นความสำคัญของการตรวจสอบความสามารถการทรงตัวในแต่ละขณะส่วนเรือใช้สอยทั่วไปก็มักสร้าง

เลียนแบบจากเรืออื่นที่ปลอดภัยอยู่แล้ว จึงไม่ค่อยใส่ใจในสมรรถนะการทรงตัวที่แท้จริงของเรือตน ว่ามีมากน้อยเพียงใด ต่างจากเรือสินค้าหรือสิ่งลอยน้ำเชิงพาณิชย์บางประเภท เช่น เรือโดยสาร แพ ภัตตาคารลอยน้ำ ฐานขุดเจาะ ฯลฯ ซึ่งจำเป็นต้องประกันความปลอดภัยให้กับสินค้าและผู้ให้บริการจึงเข้มงวดเรื่องนี้มาก จากการที่ผู้เขียนได้พบปะกับบุคคลที่เกี่ยวข้องกับการใช้เรือทั้งในภาครัฐและเอกชน พบว่าที่ผ่านมาประเทศไทยมีเรือและสิ่งลอยน้ำมากมาย ทั้งที่ได้รับอนุญาตแล้วและที่ มีการสร้างขึ้นมากใช้กันเองอีกเป็นจำนวนมาก ไม่ผ่านการพิจารณาเรื่องความสามารถในการทรงตัวอย่างจริงจัง ซึ่งต่อไปมีแนวโน้มที่ผู้เกี่ยวข้องจะต้องหันมาตรวจสอบเอาใจใส่กันมากขึ้น แน่หน่ว่าเมื่อมีการประเมินย่อมต้องเกิดกิจกรรมทดลองเอียงเรือขึ้นอย่างมากมาย จนกระทั่งหน่วยงานของรัฐดำเนินการเองไม่ไหวอาจต้องให้เอกชนหรือผู้ที่มีความพร้อมในเรื่องนี้เข้ามาดำเนินการแทน ดังเช่น การตรวจสภาพรถยนต์ในปัจจุบัน ดังนั้นผู้ที่อาจมีบทบาทเข้าไปให้ความรู้แก่หน่วยงานและบุคคลทั่วไปในตอนเริ่มต้นก็คงจะเป็นผู้ที่มีความรู้เฉพาะทางด้านนี้นั่นเอง

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงและจุดศูนย์กลางการลอยของเรือ (Center of Buoyancy) มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการทรงตัวของเรือโดยตรง (ดูรูปที่ ๑) โดยในแต่ละขณะจะพิจารณาจากความสูงศูนย์เสถียร (Metacentric Height ; $\overline{GM}$) และรัศมีศูนย์เสถียรการลอยของเรือ (Metacentric Radius ; $\overline{BM}$) เห็นได้วาระยะทั้งสองสัมพันธ์กับตำแหน่งจุดศูนย์เสถียรของเรือ (Metacenter; M) ในขั้นตอนของการออกแบบ ผู้ออกแบบเรือจำเป็นต้องทราบตำแหน่งโดยประมาณของจุดศูนย์ถ่วงเรือที่จะสร้างขึ้นใหม่ โดยประมาณจากเรือที่มีรูปร่างและสถานะการบรรทุกคล้ายคลึงกัน ต่อไปเมื่อจัดผังแบ่งส่วนภายในเรือ (Arrangements) และได้ข้อยุติเกี่ยวกับรายการน้ำหนักใหญ่ ๆ จนครบก็จะคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์รวมของบรรดาน้ำหนักทั้งหลายกับปริมาณน้ำหนักรวมทั้งหมดอย่างละเอียดอีกครั้ง ซึ่งจะทำให้



รูปที่ ๑

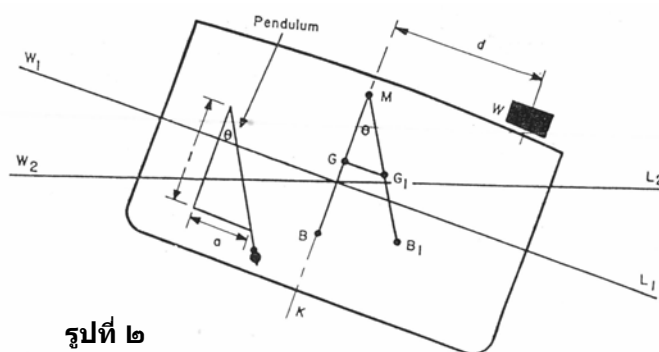
ทราบตำแหน่ง จุดศูนย์ถ่วงของเรือลำใหม่ที่ละเอียดขึ้น นอกจากจะทราบตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงแล้ว ผู้ออกแบบยังสามารถควบคุมการกระจายน้ำหนักในเรือให้เหมาะสมเพื่อให้มีระยะกินน้ำลึกหัว-ท้ายตามที่กำหนดและมีขนาดระวางขับน้ำตามต้องการ โดยปรับผังการจัดในเรือและคำนวณใหม่จนกระทั่งลงตัว ความหมายของการกระจายน้ำหนักที่กล่าวถึงคือขนาดและตำแหน่ง การวางของวัตถุทุกชิ้นบนเรือ โดยเฉพาะวัตถุที่มี น้ำหนักมาก ๆ เช่น เครื่องจักร อาวุธ สินค้า ฯลฯ เพราะสิ่งเหล่านี้มีอิทธิพลต่อตำแหน่ง จุดศูนย์ถ่วงเป็นอย่างมาก

สิ่งสำคัญที่ควรทราบประการหนึ่งคือ ลักษณะตามธรรมชาติของตำแหน่งศูนย์ถ่วงเรือ (จุด G) แตกต่างจากตำแหน่งศูนย์เสถียร (M) และศูนย์กลางของการลอย (B) กล่าวคือ จุดศูนย์ถ่วงเรือเป็น ตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับรูปร่างปริมาตรส่วนแทนที่น้ำของเรือ (Volume of Displacement) แต่ขึ้นอยู่กับ ลักษณะการกระจายน้ำหนักภายในเรือ ส่วนจุดศูนย์เสถียรและศูนย์กลางของการลอยจะสัมพันธ์กับ ลักษณะการจมของเรือ ดังนั้นจึงยากที่จะคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของเรือที่ระดับกินน้ำลึกต่าง ๆ ใ้ล่วงหน้าได้ เพราะการบรรทุกจนถึงระดับกินน้ำลึกหนึ่ง ๆ นั้นสามารถจัดวางน้ำหนักลงในเรือได้ หลากหลายวิธีและสภาพการบรรทุกของเรือจะเปลี่ยนไปตามการใช้งานอยู่เสมอ อีกทั้งต้องยอมรับว่า ถึงแม้จะเป็นเรือชนิดเดียวกันที่หนักและกินน้ำลึกเท่ากันแต่จะไม่มีทางมีการกระจายน้ำหนักภายในเรือ เหมือนกันได้ ๑๐๐% เห็นได้ชัดจากชุดเรือ (Classes) ต่าง ๆ ของกองทัพเรือที่ไม่มีลำใดมีตำแหน่งของ จุดต่าง ๆ ข้างต้นเหมือนกันเลย การประมาณจุดศูนย์ถ่วงเรือจากเรือคล้ายกันจึงมีข้อผิดพลาดที่ถูกต้อง หนัก แต่อย่างไร ก็ตามวิธีการนี้ยังมีความจำเป็นมากในขั้นตอนเบื้องต้นของการออกแบบเรือ

วิธีการหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของเรือในขั้นตอนออกแบบเบื้องต้นเริ่มกระทำคร่าว ๆ คือ แบ่ง สถานะการบรรทุกของเรือออกเป็น ๒ ส่วนใหญ่ ๆ คือ “ระวางขับน้ำบรรทุกเบา (Light Ship Displacement)” และอีกส่วนเป็น “ความสามารถในการบรรทุก” ซึ่งปริมาณส่วนหลังนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่า เป็น “Dead Weight” เห็นได้ว่าการแบ่งในลักษณะนี้จะแยกน้ำหนักเรือออกมาไว้อ้างอิงส่วนหนึ่ง และ เพื่ออีกส่วนหนึ่งไว้อธิบายถึงความจุในการบรรทุก โดยส่วนแรกจะคิดเฉพาะรายการน้ำหนักประจำหลัก ๆ เช่น ตัวเรือ (Hull) เครื่องจักร ส่วนประกอบ (Outfits) อุปกรณ์ (Equipments) น้ำในหม้อน้ำถึงระดับ ใช้ การ (ถ้ามี), ของไหลในเครื่องจักรและระบบท่อทาง แต่มักไม่รวมสิ่งต่อไปนี้คือ ของเหลวที่บรรจุอยู่ใน ถัง (Tanks), ลูกเรือ, สัมภาระ, สินค้า อาวุธยุทโธปกรณ์ ซึ่งโดยปกติแล้วนักออกแบบจะกำหนดให้ สถานะบรรทุกนี้เป็น “สถานะบรรทุกเบา (Light Ship Displacement)” และมีหน่วยวัดเช่นเดียวกับน้ำหนัก สิ่งของ ทั่วไป ส่วนความสามารถในการบรรทุกนิยมวัดเป็น “Tonnage” ซึ่งเป็นปริมาตรของระวางบรรทุก (๑ Tonnage เท่ากับประมาณ ๑๐๐ ft^3 หรือ ๒.๘๓ m^3) หรืออีกนัยหนึ่งคือความสามารถในการบรรทุกที่มี หน่วยวัดเป็นปริมาตร โดยปกติแล้วเมื่อเรือแต่ละชนิดบรรทุกตามเกณฑ์จนเต็มพิกัดดังกล่าว (เต็ม ปริมาตร) เรือจะกินน้ำลึกพอดีกับเส้นแนวน้ำฤดูร้อน (Summer Draft) และเรียกสถานะบรรทุกเช่นนี้ว่า เป็น “ระวางขับน้ำเต็มที่ (Full Load Displacement)” ดังนั้น Dead Weight คือผลต่างระหว่าง Full Load Displacement กับ Light Ship Displacement และมักคำนวณตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงทั้งสองสถานะ นี้ไว้ล่วงหน้า แต่อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะทราบข้อมูลเกี่ยวกับน้ำหนักในเรือได้อย่างละเอียด **ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงที่ได้จากการคำนวณจะถือว่ายังเป็นค่าโดยประมาณจนกว่าจะถูกพิสูจน์ด้วยการทดลองเอียงเรือ**

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงที่แท้จริงจะหาได้จากการทดลองเอียงเรือ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะกับเรือที่ต่อขึ้นใหม่และเรือที่มีการเปลี่ยนแปลงรายการน้ำหนักเป็นปริมาณมาก ๆ เช่น เรือหลวงชุดตาปี ที่ดัดแปลงเปลี่ยนระบบอาวุธ หรือ เรือหลวงมกุฎราชกุมารที่น้ำหนักมากพอสมควรไปเพิ่มไว้ที่สูงบนเรือ ล้วนถูกนำไปทดลองเอียงหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงด้วยกันทั้งสิ้น

การทดลองเอียงเรืออาศัยหลักการสมดุลในการลอยของเรือผนวกกับความรู้เกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายน้ำหนักภายในเรือและธรรมชาติการลอยของเรือ ก่อนทำการทดลองจะต้องประมาณขนาดน้ำหนัก (w) และระยะเคลื่อนย้าย (d) ของน้ำหนักที่จะใช้ทดลอง (น้ำหนักที่ใช้ควรเป็นปริมาณที่ทำให้เรือเอียงเพียงเล็กน้อยก็พอ) กำหนดล่วงหน้าได้ด้วยการคำนวณ



ย้อนกลับจากระยะที่คาดว่าจะเคลื่อนย้ายโดยใช้ค่าความสูงศูนย์เสถียรโดยประมาณของเรือเป็นเกณฑ์ไว้ก่อน การประมาณความสูงศูนย์เสถียรนั้นอาจนำมาจากเรือที่มีลักษณะคล้ายกันหรือดัดแปลงจากข้อมูลทดลองเอียงเรือลำนี้ครั้งล่าสุด ส่วนระยะที่จะเคลื่อนย้ายน้ำหนักให้ดูตามความเหมาะสมของสถานที่และให้สอดคล้องกับความเอียงที่คาดว่าจะเกิด โดยปกติแล้วจะต้องเตรียมน้ำหนักไว้หลายชุดกระจายกันและควรจัดให้มีการเคลื่อนย้ายทางขวางหลายระยะ ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของการทดลองและความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและผูกมัด เมื่อกำหนดขนาดและตำแหน่งที่วางเรียบร้อยแล้วให้ทำเครื่องหมายขนาดของน้ำหนักแต่ละก้อนพร้อมทั้งตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของน้ำหนักแต่ละก้อนไว้ให้ชัดเจน การเคลื่อนย้ายอาจใช้รางเลื่อนหรือเครื่องมือช่วยยกในเรือเป็นตัวเคลื่อนย้าย เมื่อเคลื่อนย้ายน้ำหนักไปตรงระยะที่กำหนดไว้ แล้วจะต้องยึดน้ำหนักนั้น ๆ ไว้ให้อยู่กับที่ ส่วนค่าการเอียงอาจอ่านจากระยะเบี่ยงของสายดิ่งโดยตรง (ระยะ a ในรูปที่ ๒) หรือด้วยเทคนิคพิเศษอื่น ๆ

การทดลองเอียงเรือมิใช่ว่าจะกระทำเพียงครั้งเดียวแล้วข้อมูลจะใช้ได้ตลอดไป หากมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับตำแหน่งการวางน้ำหนักในเรือหรือกระทำการใด ๆ ที่มีผลต่อน้ำหนักรวมของเรือมากพอสมควร ก็ควรทดลองเอียงเรือเพื่อหาความสูงศูนย์เสถียรของเรือเสมอ

การเตรียมการทดลองเอียงเรือ

ก่อนที่จะทดลองเอียงเรือจะต้องมีการเตรียมการล่วงหน้าอย่างถูกต้อง คำแนะนำสำหรับการเตรียมการที่สำคัญมีดังนี้

๑. ควรทดลองเอียงเรือในน้ำนิ่งในขณะที่กระแสลมมีกำลังอ่อนเพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของลมและคลื่นที่อาจมีต่อการทดลอง ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนและเสียเวลามาก หากหลีกเลี่ยงไม่ได้ให้หันหัวเรือหรือท้ายเรือสู่ลมไว้ตลอดเวลา สถานที่ซึ่งนับว่าเหมาะสมกับการทดลองเอียงเรือมากที่สุดคือภายในอ่างของอยู่เรือ

๒. ในขณะที่ทดลองควรปล่อยให้เรือลอยได้อย่างอิสระไม่มีสิ่งใดขัดขวางการลอยของเรือ เชือกที่ผูกเรือต้องคลายหรือปลดออกทั้งหมดและต้องพร้อมที่จะเข้าควบคุมเรือได้ทุกขณะ นอกจากนั้นต้องแน่ใจว่าระดับน้ำขณะทดลองสูงพอที่ท้องเรือจะไม่แตะกับพื้นหรือโดนกับวัตถุข้างเรือหรือวัตถุใต้น้ำใด ๆ ในระหว่างทำการทดลอง

๓. ผู้กมัดและจัดเก็บสิ่งของต่าง ๆ บนเรือมิให้เคลื่อนที่ได้ ตรวจสอบบรรดาน้ำหนักที่แขวนอยู่ เช่น เรือช่วยชีวิต เคนหรือลอกขนาดใหญ่ สิ่งของในที่ลับตา ... ฯลฯ โดยจะต้องยึดให้แน่นมิให้แกว่ง ในขณะที่ทดลอง เพราะการแกว่งไปมาของน้ำหนักต่าง ๆ ในเรือจะส่งผลกับความละเอียดในการทดลองและทำให้การทดลองใช้เวลามาก

๔. ไม่ควรมีผลของผิวหน้าอิสระ (Free Surface Effects) เกิดขึ้นขณะทดลองแก้ไขโดยบรรจุของไหลในถัง (Tanks) หรือที่บรรจุต่าง ๆ ให้เต็มหรือมีฉะนั้นก็ปล่อยให้ว่าง โดยปกติมักหลีกเลี่ยงไม่ได้ดังนั้นจึงต้องวัดปริมาตรของไหลที่เกิดผิวหน้าอิสระทั้งหมดให้ละเอียดที่สุดเพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณค่าแก้ไขเนื่องจากเกิดผิวหน้าอิสระ (Free Surface Correction; F.S.C) ต่อไป ส่วนของเหลวตามท่อทางต่าง ๆ เช่น ระบบระบายความร้อน ระบบปรับอากาศ ระบบหล่อลื่น ฯลฯ ให้บรรจุไว้ใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง

๕. ในขณะที่ทำการทดลองผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องทั้งหมดไม่ควรที่จะอยู่บนเรือ และควรจัดผู้ปฏิบัติการในเรือให้มีจำนวนและอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของเรือ

๖. ก่อนเริ่มทำการทดลองควรปรับแต่งเรือให้ตั้งตรงมากที่สุด ในกรณีที่เรือไม่สามารถลอยตั้งตรงได้ให้บันทึกมุมเอียงแรกเริ่มก่อนทำการทดลองเป็นค่ามุมเอียงถาวร “Residual List” ไว้ และถ้าเป็นไปได้ไม่ควรให้เรือเกิดทริม (Trim) ถ้าเรือยังเกิดทริมแตกต่างจากลักษณะการลอยปกติของเรือจะต้องแก้ไขให้ถูกต้องก่อน

๗. ควรทราบความหนาแน่น (Density) ของน้ำในขณะที่ทำการทดลอง โดยใช้ Hydrometer วัดค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำที่บริเวณใกล้ ๆ กับที่ทำการทดลองสัก ๒ - ๓ แห่ง ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถคำนวณขนาดระวางขับน้ำของเรือได้อย่างถูกต้อง (ต้องปรับแก้ขนาดระวางขับน้ำตามความหนาแน่นของน้ำ) ในกรณีที่ไม่มี Hydrometer ให้วัดอุณหภูมิของน้ำแล้วหาความหนาแน่นจากตารางคุณสมบัติ

ของน้ำนั้น ๆ (คำแนะนำนี้ไม่เข้มงวดนักเมื่อทดลองเรือในเขตร้อน เพราะอุณหภูมิของน้ำไม่แตกต่างกันมาก

ตลอดเวลาทดลอง)

๘. เตรียมน้ำหนักที่ทราบขนาดและตำแหน่งศูนย์ถ่วงที่แน่นอน (ประมาณ ๐.๕% ของระวางขับน้ำ) หากต้องการความละเอียดและมีพื้นที่ในการทดลองมากอาจเตรียมไว้หลายขนาดและควรทำแผนการ เคลื่อนย้ายน้ำหนักไว้ล่วงหน้า นำน้ำหนักที่เตรียมไว้ติดตั้งบนเรือในแนวกึ่งกลางลำเรือ (Centerline) หรือเหนือจุดศูนย์ถ่วงโดยประมาณของเรือ พร้อมทั้งทำเครื่องหมายขนาดน้ำหนัก จุดที่วางและจุดศูนย์ถ่วงของ น้ำหนักไว้ให้ชัดเจน ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของน้ำหนักจะมีประโยชน์ในการคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง รวมของเรือทั้งในทางขวาง (KG_T) และทางยาว (LCG) โดยเฉพาะเมื่อมิได้ติดตั้งน้ำหนักเหล่านั้นไว้เหนือจุดศูนย์ถ่วงเดิมของเรือพอดี

๙. ติดตั้งลูกดิ่ง (มักทำจากโลหะน้ำหนักประมาณ ๕ - ๑๐ ปอนด์) และสายดิ่งที่ทราบระยะแน่นอนและสามารถอ่านค่าความเบี่ยงเบนได้ (ควรมี ๒ ชุด หรือมากกว่าเพื่อเปรียบเทียบกัน) โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งในแนวเส้นกึ่งกลางลำเรือ จะไว้บนที่สูงหรือต่ำก็ได้แต่ต้องระวังมิให้ถูกลมรบกวน หากมีสายดิ่งหลายชุดให้ติดตั้งไว้ตามสถานที่ต่าง ๆ เช่น ที่ หัวเรือ ท้ายเรือ และกลางลำ

๑๐. ควรทราบค่าประมาณของความสูงศูนย์เสถียรในขณะปัจจุบันของเรือที่เรียกว่าสถานะ “As Inclined” ถ้าเป็นเรือที่ต่อใหม่และทดลองเป็นครั้งแรกค่านี้จะได้จากการคำนวณหรือประมาณจากเรือที่มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกัน **หากเป็นการทดลองหลังจากดัดแปลงน้ำหนักต่าง ๆ ในเรือ ให้ประมาณจากเส้นโค้ง Hydrostatics หรือจากผลการทดลองครั้งล่าสุด** เหตุผลที่จำเป็นต้องทราบระยะโดยประมาณดังกล่าวก่อนทำการทดลองก็เพื่อสามารถเตรียมน้ำหนักและระยะเคลื่อนย้ายได้เหมาะสม ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและคาดหวังผลการคำนวณที่เชื่อถือได้ นอกจากนั้นจะยังทำให้ทราบระวางขับน้ำในขณะทดลองอีกด้วย (น้ำหนักเรือ + น้ำหนักที่ใช้เคลื่อนย้าย)

๑๑. ควรจัดทำแผนการเคลื่อนย้ายและแผนการสื่อสารไว้ล่วงหน้า อันจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการปฏิบัติและการตรวจสอบความถูกต้อง ส่วนใหญ่แล้วขั้นตอนต่าง ๆ จะถูกสรุปเป็นตารางสำหรับจัดบันทึกผลการทดลอง แผนงานที่ดีนอกจากจะช่วยให้การทดลองถูกต้องแม่นยำแล้วยังลดความสับสนและช่วยให้การทดลองเสร็จสิ้นได้โดยเร็ว

การปฏิบัติในขณะทดลองเอียงเรือ

หลังจากเตรียมการล่วงหน้าอย่างถูกต้องต่อไปให้ดำเนินการดังนี้

๑. คลายเชือกให้เรือลอยอย่างอิสระ

- บันทึกอุณหภูมิและความถ่วงจำเพาะของน้ำขณะนั้น
- บันทึกระดับกินน้ำลึกที่กลางลำ หัวเรือและท้ายเรือเพื่อคำนวณทริม (Trim)

- บันทึกมุมเอียงแรกเริ่ม (Residual List) ก่อนทำการทดลอง (ถ้ามี)

๒. เคลื่อนน้ำหนักตามแผนที่เตรียมไว้ซึ่งอาจใช้ล้อเลื่อนหรืออุปกรณ์ช่วยยกในเรือ เมื่อเคลื่อนย้ายเสร็จให้ผู้คุมน้ำหนักนั้นไว้ให้แน่นและบันทึกสิ่งต่อไปนี้

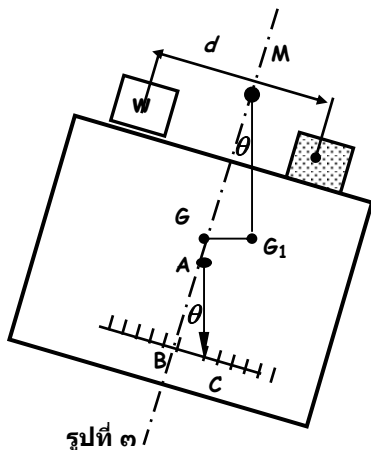
- ปริมาณน้ำหนักที่เคลื่อนย้ายในแต่ละครั้ง
- ความสูงจุดศูนย์ถ่วงน้ำหนักที่เคลื่อนย้ายขึ้นสูงหรือต่ำกว่าแนวเดิม
- ระยะที่เคลื่อนย้าย (d)

๓. การเคลื่อนย้ายน้ำหนักแต่ละครั้งจะทำให้เรือเอียงเล็กน้อย ในเบื้องต้นเรือจะโคลงไปมา ซึ่งจะต้องรอให้เรือและสายดิ่งนิ่งแล้วจึงจวัดระยะที่สายดิ่งเบี่ยงเบนไปหรือมุมเอียงที่เกิดขึ้น (ถ้าวัดได้) (ระยะ BC และ มุม θ ในรูปที่ ๓) ถ้าใช้สายดิ่งหลายชุดการสื่อสารจะยังมีความจำเป็น

๔. ทำซ้ำข้อ ๑ ถึง ๓ กับน้ำหนักและระยะเคลื่อนย้ายอื่นตามแผนที่เตรียมไว้ (ยิ่งมากครั้งยิ่งทำให้การทดลองละเอียด)

๕. นำมุมเอียง ขนาดน้ำหนัก และระยะการเคลื่อนย้ายที่บันทึกไปคำนวณหาความสูงศูนย์เสถียรของเรือต่อไป

วิเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ ๓

เมื่อน้ำหนักปริมาณ w ดังในรูปที่ ๓ ถูกเคลื่อนทางขวางเป็นระยะ d ทำให้จุดศูนย์ถ่วงของเรือเคลื่อนที่จากจุด G ไปยังจุด G_1 ในทิศขนาน (โดยประมาณ) กับทางเดินของน้ำหนัก ในการนี้คำนวณหาความสูงศูนย์เสถียรได้จากการวิเคราะห์สามเหลี่ยมคล้าย ABC และ MGG_1

ดังนี้ จากสามเหลี่ยม ABC ; $\tan \theta = \frac{BC}{AB}$ (๑)

โดย AB = ความยาวสายดิ่ง และ BC = ระยะที่สายดิ่งเบี่ยงไป

และ จากสามเหลี่ยม MGG_1 ; $\tan \theta = \frac{GG_1}{GM}$ (๒)

โดย GM = ความสูงศูนย์เสถียรที่ต้องการหา

GG_1 = ระยะการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์ถ่วงเรือเนื่องจากการเคลื่อนน้ำหนัก w

ความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมคล้าย ABC และ MGG_1 คือ $\frac{GM}{GG_1} = \frac{AB}{BC}$ (๓)

โดยที่ระยะ GG_1 เกิดจากการกระทำของโมเมนต์ปริมาตร $w \times d$ เมื่อเรือมีระวางขับน้ำเท่ากับ Δ ดังนั้น แทนค่า $GG_1 = \frac{w \times d}{\Delta}$ ลงในสมการที่ (๓) จะคำนวณความสูงศูนย์เสถียรได้ดังนี้

$$GM = \frac{AB}{BC} \times \frac{w \times d}{\Delta} \dots\dots\dots (๔)$$

จากสมการที่ (๔) เห็นได้ว่าเมื่ออ่านระยะสายตั้ง (AB และ BC) และทราบขนาดน้ำหนัก และระยะเคลื่อนย้ายจะสามารถคำนวณระยะ GM ของเรือขณะนั้นได้

เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจความสัมพันธ์ของความเอียงกับตำแหน่งจุดอ้างอิงต่าง ๆ ของเรือ ผู้เขียนจะแสดงตัวอย่างคำนวณข้อมูลการเอียงเรืออย่างง่าย ดังนี้

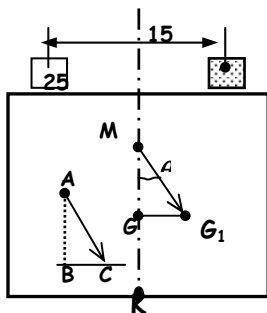
ตัวอย่างที่ ๑ หลังจากเตรียมการทดลองเอียงเรือลำหนึ่งอย่างถูกต้องพบว่า ในสภาพก่อนการทดลองเรือมีระวางขับน้ำ ๘,๐๐๐ ตัน และมีระยะ $KM = ๗$ m. อุปกรณ์ที่เตรียมไว้คือ สายดิ่งพร้อมลูกดิ่งยาว ๔ m. น้ำหนักจำนวน ๒๕ ตัน สำหรับเคลื่อนย้ายจากกลางลำไปยังกราบขวาเป็นระยะ ๑๕ m. ผลจากการเลื่อนน้ำหนักทำให้สายดิ่งเบี่ยงออกจากแนวเดิมเป็นระยะ ๒๐ cm. จงคำนวณหาความสูงศูนย์เสถียรและตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงลำสุดท้ายของเรือลำนี้ (สมมุติว่าจุดศูนย์เสถียรอยู่คงที่ตลอดการทดลอง)

วิธีทำ พิจารณาสามเหลี่ยมคล้าย ABC และ MGG_1 ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้ $\frac{GM}{GG_1} = \frac{AB}{BC}$

แทนค่า $w = 25$ tons, $d = 15$ m., $AB = 4$ m., และ $BC = 0.2$ m.

$$\text{ดังนั้น } GM = GG_1 \times \frac{AB}{BC} = \frac{w \times d}{\Delta} \times \frac{AB}{BC} = \frac{25 \times 15}{(8,000 + 25)} \times \frac{4}{0.2} = 0.9346 \text{ m.}$$

เมื่อระยะ KM คงที่ ดังนั้น $KG = KM - GM = 7.0 - 0.9346 = 6.0654$ m.



รูปที่ ๔

(เฉพาะมุมเอียงไม่มาก) ซึ่งก็คือ

$$\text{Slope} = \frac{\text{Inclining Moment}}{\tan \theta} = \text{คงที่} \dots\dots\dots (๕)$$

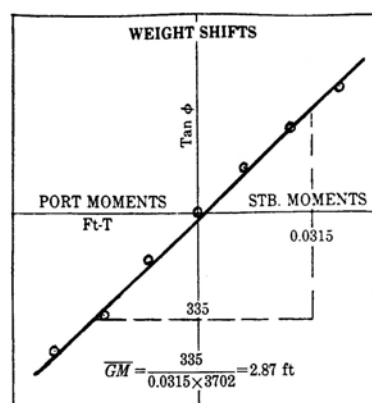
$$\text{ดังนั้นจากสมการที่ (๔) } GM_{\text{As Inclined}} = \frac{GG_1}{\tan \theta} = \frac{w \times d}{\tan \theta} = \frac{\text{slope}}{\Delta} \dots\dots\dots (๖)$$

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าหากต้องการผลการคำนวณที่ละเอียดไม่ควรใช้น้ำหนักเพียงชุดเดียว โดยทั่วไปเพื่อเป็นหลักประกันความถูกต้องของการทดลองมักเตรียมน้ำหนักไว้หลายชุดและจัดให้มีการเลื่อนจากกลางลำไปทั้ง ๒ กราบของเรือ ทั้งนี้เนื่องจากตามหลักการแล้วไม่ว่าจะเลื่อนน้ำหนักปริมาณเท่าใดไปกราบใดก็ตาม **ค่าความลาดเอียง (Slope) ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์เอียงเรือกับ Tangent ของมุมเอียง ($\tan \theta$) จะมีค่าคงที่เสมอ**

เมื่อพล็อตความสัมพันธ์ในสมการที่ (๕) ระหว่าง Inclining Moment กับ $\tan \theta$ ที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งของการทดลองจะได้แผนภูมิที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง รูปที่ ๕ เป็นตัวอย่างของแผนภูมิความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองเอียงเรือขนาด ๓,๗๐๒ tons ความชันของเส้นตรงที่พล็อตได้นี้จะมีประโยชน์ในการคำนวณความสูงศูนย์เสถียรในสมการที่ (๖) ต่อไป ข้อมูลส่วนที่กระจายออกจากแนวเส้นตรงไป

มากบ่งถึงความคลาดเคลื่อนของการทดลองครั้งนั้น ๆ และสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุความผิดปกติดังกล่าวได้โดยง่าย

การคำนวณดังในตัวอย่างที่ ๑ จะได้คำตอบสอดคล้องกับสถานะขณะทดลองเอียงเรือ (As Inclined Condition) เท่านั้น คำตอบนี้เป็นคนละสถานะกับระวางขับน้ำเบาของเรือ (Light Ship Condition) เพราะฉะนั้นเมื่อคำนวณความสูงศูนย์เสถียรดังกล่าวได้แล้วจะต้องคำนวณต่อเนื่องอีกโดยนำน้ำหนักเพิ่มเข้าหรือเอาออกจากเรือให้สอดคล้องกับสถานะบรรทุกเบาที่แท้จริงของเรือต่อไป และมักจะมีผลของผิวหน้าอิสระมาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ ถ้ากำหนดให้ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงที่สถานะบรรทุกเบาอยู่ที่ G_0 การแก้ผลของผิวหน้าอิสระในเรือคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ ๕

$$KG_1 = KM - GM_{As\ Inclined} - FSC \quad \dots\dots\dots (๗)$$

โดย KG_1 คือ ความสูงจุดศูนย์ถ่วงที่คำนวณได้จากสถานะทดลองเอียงเรือ

$$G_1M = GM_{As\ Inclined} = \text{ความสูงจุดศูนย์เสถียรที่คำนวณได้จากสถานะทดลองเอียงเรือ}$$

$$FSC = \text{ค่าแก้ผิวหน้าอิสระ} = \sum \left(\frac{\gamma_i}{\gamma} \cdot \frac{i}{\nabla} \right) \quad \dots\dots\dots (๘)$$

i = โมเมนต์อินเนอร์เซียของผิวหน้าอิสระของไหล

γ_i = น้ำหนักจำเพาะของของไหลที่ทำให้เกิดผิวหน้าอิสระ

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำที่เรือลอยอยู่

∇ = ปริมาตรระวางขับน้ำขณะนั้นของเรือ

ดังนั้นตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงเรือในสถานะบรรทุกเบาหาได้โดย หักโมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักส่วนที่ต่างกับสถานะบรรทุกเบาออกไป ดังนี้

$$\begin{aligned} KG_0 &= (\text{โมเมนต์รวม} \pm \text{โมเมนต์ที่ต่างจากสถานะบรรทุกเบา}) / \text{ระวางขับน้ำบรรทุกเบา} \\ &= \frac{KG_1 \times \Delta_1 \pm [\sum (w_i \times Kg_i)]_{As\ Inclined}}{\Delta_0} \quad \dots\dots\dots (๙) \end{aligned}$$

โดย KG_0 = ความสูงจุดศูนย์ถ่วงของเรือในสถานะบรรทุกเบา (ไม่มีผิวหน้าอิสระ)

KG_1 = ความสูงจุดศูนย์ถ่วงเรือในขณะทดลองเอียงเรือ (ไม่มีผิวหน้าอิสระ)

Δ_1 = ระวังขับน้ำในขณะทดลองเอียงเรือ

Δ_0 = ระวังขับน้ำในสภาพบรรทุกเบา = $\Delta_1 \pm \Sigma(w_i)$

$\Sigma(w_i \times Kg_i)_{As\ Inclined}$ = โมเมนต์รวมของน้ำหนักส่วนที่ต่างจากสถานะบรรทุกเบา ("1" หมายถึงในสถานะทดลองเอียงเรือ และ "0" หมายถึงสถานะบรรทุกเบา)

เหตุผลที่ต้องคำนวณความสูงจุดศูนย์ถ่วงในสถานะบรรทุกเบาก็เพราะจะใช้เป็นสถานะอ้างอิงสำหรับคำนวณเรือในสถานะการบรรทุกแบบอื่น ๆ ถ้ากำหนดให้ $KG_{Operating}$ เป็นความสูงจุดศูนย์ถ่วงที่สถานะใช้การใด ๆ ดังนั้น ค่าความสูงจุดศูนย์ถ่วงเทียบกับสถานะบรรทุกเบาได้ดังนี้

$$KG_{Operating} = \frac{KG_0 \times \Delta_0 \pm \Sigma(w_i \times Kg_i)}{\Delta_{Operating}} \dots\dots\dots (๑๐)$$

โดย $\Sigma(w_i \times Kg_i)$ = โมเมนต์ของน้ำหนักส่วนที่ต่างจากสถานะบรรทุกเบา

$\Delta_{Operating}$ = ระวังขับน้ำสถานะบรรทุกปัจจุบัน

ตัวอย่างที่ ๒ เรือลำหนึ่งมีระวางขับน้ำ ๑๔๐.๒๓ tonnes ถูกทดลองเอียงเพื่อหาความสูงศูนย์เสถียรโดยใช้น้ำหนักจำนวน ๖ ชด ติดตั้งบนเรือและเคลื่อนย้ายทางขวางเป็นระยะ ๗.๕ m. เท่ากันในการนี้ได้ใช้สายดิ่ง ๒ ชด ติดตั้งไว้ที่บริเวณหัวเรือและท้ายเรือ ถ้าสายดิ่งมีความยาว ๓,๙๔๐ mm. และ ๓,๙๙๐ mm. ตามลำดับ และมีผลการทดลองเอียงเรือดังในตารางข้างล่างจงคำนวณหาความสูงจุดศูนย์ถ่วงของเรือ ข้อมูลจากรายงานการทดลองเอียงเรือ (Inclining Experiment Report) เป็นดังนี้

Length (B.P.) 37.95 m. Breadth (B_{MLD}) 8.00 m.
Depth (D_{MLD}) 2.40 m. Density 1.013 tonnes/m³

Ship Information (from Hydroststic Curves) :

Displacement (tonnes)	140.23	165.0
VCB (m. Above Keel)	0.359	0.359
KM (m.)	7.854	9.2413

ลำดับที่	น้ำหนัก (tonnes)	ระยะ (m.)	ทิศทางการย้าย	ระยะเบี่ยง (mm.)	
				ท้ายเรือ	หัวเรือ
1	3.12	7.15	S-P	76	75
2	2.37	7.15	S-P	55	56
3	5.49	7.15	P-S	131	131
4	3.15	7.15	P-S	79	81
5	2.51	7.15	P-S	59	61
6	5.66	7.15	S-P	138	141

รวม	22.30			538	545
-----	-------	--	--	-----	-----

หมายเหตุ S = Starboard =กราบขวา P = Port =กราบซ้าย

วิธีทำ จากตารางข้อมูลทดลองเอียงเรือ คำนวณระยะเอียงเฉลี่ย/มวล 1 tonne ได้ดังนี้

ระยะเอียงเฉลี่ย/มวล 1 tonne (mm./tonne)	ท้ายเรือ	หัวเรือ
$\frac{\Sigma Deflection}{\Sigma Weight}$	$\frac{538}{22.3} = 24.13^0$	$\frac{545}{22.3} = 24.44^0$

ดังนั้น ความชันเฉลี่ยของสายดิ่งที่ท้ายเรือและหัวเรือที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายมวลขนาด 1 tonne คือ

$$\tan \phi_{AFT} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยการวัดที่ท้ายเรือ}}{\text{ความยาวสายดิ่งท้ายเรือ}} = \frac{24.13}{3890} = 0.0062$$

$$\tan \phi_{FWD} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยการวัดที่หัวเรือ}}{\text{ความยาวสายดิ่งหัวเรือ}} = \frac{24.44}{3940} = 0.0062$$

$$\therefore \text{ความชันเฉลี่ยของการทดลองนี้คือ } \tan \phi_{Average} = \frac{\tan \phi_{AFT} + \tan \phi_{FWD}}{2} = 0.0062$$

เมื่อทราบความชันเฉลี่ยจะคำนวณหาความสูงศูนย์เสถียร ได้ดังนี้

$$GM = GG_1 \times \frac{AB}{BC} = \frac{\Sigma(w_i \times d_i)}{\Delta} \cdot \frac{AB}{BC}$$

ในที่นี้ $\frac{AB}{BC} = \frac{1}{\tan \phi_{Average}} = \frac{1}{0.0062}$ เมื่อกำหนดให้ $w =$ มวล 1 Tonne

$$\text{เพราะฉะนั้น } GM = \frac{w \times d}{\Delta \times \tan \phi_{Average}} = \frac{1 \times 7.15}{(140.23 + 22.3) \times 0.0062} = 7.0955 \text{ m.}$$

ดังนั้นความสูงศูนย์เสถียรขณะปัจจุบันของเรือลำนี้คือ ๗.๐๙๕๕ m. เมื่อนำไปตรวจสอบกับเส้นโค้ง Hydrostatics ของเรือที่ระวางขับน้ำ ๑๖๒.๕๓ ตัน พบว่าจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร (M) อยู่สูงจากกระดูกงูเท่ากับ ๙.๑๐๓ m. (Interpolate จากตาราง Hydrostatics ที่กำหนดให้) ดังนั้นจุด G จึงอยู่สูงจากกระดูกงูเท่ากับ $KM - KG = 9.103 - 7.0955 = 2.0075 \text{ m.}$ ขั้นตอนต่อไปคือนำระยะความสูงที่ได้ไปตรวจสอบสมรรถนะการทรงตัวของเรือว่าผ่านเกณฑ์หรือไม่ เช่นตรวจสอบกับ Load Line Rule ของ I.M.O. หรือ เกณฑ์ของ U.S. Navy Criteria เป็นต้น

สรุป

ถึงแม้เรือจะมีขนาดใหญ่โตและมีอุปกรณ์ภายในซับซ้อนมากมายเพียงใดก็ตาม เรายังสามารถหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงโดยรวมของเรือทั้งลำได้อย่างง่ายดายด้วยการนำไปทดลองเอียง การทดลองเอียงเรือเป็นบทพิสูจน์ความรู้เรื่องจุดศูนย์ถ่วงและสมดุลการลอยของวัตถุ เป็นศาสตร์และศิลป์ที่อาศัย



ความรู้พื้นฐานทางเรืออย่างถ่องแท้และเกี่ยวข้องกับผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับเรือโดยตรง ผู้เขียนจะพยายาม
นำบทประยุกต์ของวิศวกรรมทางเรือที่เป็นประโยชน์เช่นนี้มาเสนอในโอกาสต่อไป