

การวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้างเรือที่เกิดจากการระเบิดใต้น้ำ

Stress Analysis of Ship Structure Subjected to Underwater Explosion

วีรวัดณ์ วงษ์ดนตรี¹, พงศ์สรร ถวิลประวีต², อรรถสิทธิ์ พงษ์เกษตรกรรม³, สุमितร ชอบสะอาด⁴, มนต์ชัย กาทอง⁵

^{*}กรมอุทกทหารเรือ อรุณอัมรินทร์ บางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร 10700

โทร 0-2475-4011 โทรสาร 0-2475-4030

^{**}ภาควิชาวิศวกรรมต่อเรือ และเครื่องกลเรือ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

อีเมล ¹weerawat_wongdontri@yahoo.com, ²opongsan@yahoo.com, ³at_pong@yahoo.com,

⁴sumit.c@navy.mi.th, ⁵monchai@src.ku.ac.th

Weerawat Wongdontri¹, Pongsan Twinprawate², Atthasit Pongkhasetkham³, Sumit Chobsaard⁴, Monchai Katong⁵

^{*}Royal Thai Naval Dockyard, Arun-Amarin, Bangkok-Noi, Bangkok, Thailand 10700

Tel: 0-2475-4011 Fax: 0-2475-4030

^{**}Department of Naval Architecture & Marine Engineering, Faculty of Engineering,

Kasetsart University Si Racha Campus, Si-Racha, Chonburi 20230

E-mail: ¹weerawat_wongdontri@yahoo.com, ²opongsan@yahoo.com, ³at_pong@yahoo.com,

⁴sumit.c@navy.mi.th, ⁵monchai@src.ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอผลงานการวิเคราะห์ความเค้นของโครงสร้างเรือที่เกิดจากการระเบิดใต้น้ำ ซึ่งเป็นผลงานส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “ระยะปลอดภัยสำหรับเรือล่าทำลายทุ่นระเบิด” ที่ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม โดยทั่วไปการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถทำได้สองวิธี กล่าวคือจากการตรวจวัดความเค้นตามตำแหน่งที่ต้องการจากการนำเรือไปทดลองกับระเบิดใต้น้ำจริง และการคำนวณค่าความเค้นจากการจำลองการระเบิดด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งวิธีหลังจะมีค่าใช้จ่ายต่ำ และลดระยะเวลาการวิเคราะห์ได้มาก นับเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ต่อไป ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้จำลองโครงสร้างของเรือด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการคำนวณค่าความเค้นที่กระทำกับแบบจำลองโครงสร้างของเรืออันเกิดจากค่าช็อคของระเบิดใต้น้ำจากสมการ Similitude จากนั้นนำค่าผลลัพธ์แรงเค้นตอบสนองแบบ Transient ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของเรือที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลของความเค้นที่เกิดจากการทดลองระเบิดใต้น้ำจริง ซึ่งผลของการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องเป็นไปในแนวทางเดียวกัน

Abstract

This paper presents a stress analysis of ship structure subjected to underwater explosion, which is extracted from the

research project entitled “Safety Distance for Mine Hunter Vessel”, supported by the Defence Research and Development Office. In general, the analysis can be carried out by two methods; firstly, measuring the stresses at various interested locations by conducting a live underwater explosion test and secondly, calculating the stresses by simulating the underwater explosion with computerize model. The latter method has been proven to be more cost-effective and less time-consuming, which can be usefully applied to any other purposes as required. In this study, a ship structure model is formulated by Finite Element program, and then a shock load caused by underwater explosion, which is calculated from similitude equation, is applied to the model. The stress results in transient mode of the response occurred at various locations of the ship are compared with the stress results measured from the underwater explosion test. The comparison results show a good agreement within the same trend.

1. ความเป็นมา

การศึกษาครั้งนี้ทำเพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเปลือกโครงสร้างเรือที่ต้องรองรับแรง Shock Load จากการระเบิดใต้น้ำเป็น

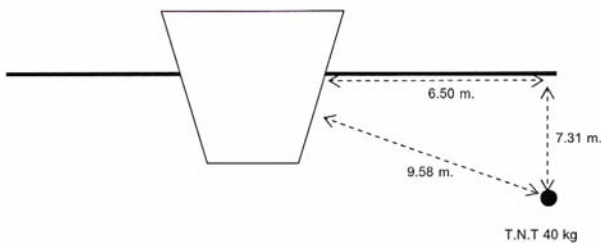
ที่สนใจของบริษัทผู้สร้างเรือ และกองทัพเรือทั่วโลกมาเป็นเวลานาน ในอดีตการตรวจวัดค่าดังกล่าวกระทำได้เพียงการนำเรือที่ต้องการวิจัยเข้าทำการทดสอบในสนามทุระเบิดจริง ซึ่งเสียทั้งเวลา และค่าใช้จ่ายที่สูงมาก อีกทั้งจะต้องมีการเตรียมการที่ดีเพื่อให้สามารถตรวจวัดได้ผลตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามเมื่อเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ก้าวหน้าขึ้น การวิเคราะห์โดยใช้การจำลองสถานการณ์ (Computer Simulation) ก็เริ่มแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับอย่างรวดเร็ว รวมทั้งความก้าวหน้าของโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมที่อาศัยหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ก็สามารถทำการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงจนสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งาน กรมอุทกหารเรือ ซึ่งมีหน้าที่รับผิดชอบทางด้านวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับเรือของกองทัพเรือจึงได้ทำการศึกษาวิจัยการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ เพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับปฏิบัติการทางทหารที่เกี่ยวข้อง และสร้างองค์ความรู้ทางด้านการระเบิดใต้น้ำไว้ใช้งานในด้านอื่น ๆ ต่อไป

2. การทดลองระเบิดใต้น้ำ

บริษัท Intermarine ได้ทำการทดสอบโครงสร้างเรือที่สร้างจากวัสดุ Glass Reinforce Plastic (GRP) เพื่อตรวจวัดหาค่าความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเรือเมื่อได้รับแรงกระแทก (Shock Load) จากการระเบิดใต้น้ำที่ระยะห่างต่าง ๆ ออกไปจากตัวเรือ [1] ซึ่งค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้นี้จะนำไปคำนวณหาค่าความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของวัสดุ GRP เพื่อพิสูจน์ความแข็งแรง และนำไปใช้สร้างเรือประเภทต่าง ๆ ตามภารกิจ และความต้องการ

2.1 วิธีการทดลอง

การทดลองกระทำโดยการสร้างชิ้นจำลองย่อส่วน (Test Section) เฉพาะส่วนของห้องเครื่องจักร ที่มีขนาด 2/3 เท่าของขนาดที่ออกแบบไว้จริง จากนั้นดำเนินการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) ไว้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่สนใจจะตรวจวัด จากนั้นนำเรือจำลองที่สร้างขึ้นไปลอยล้าอยู่ ณ บริเวณที่จะทำการทดลอง ทำการจุดระเบิดใต้น้ำที่ระยะห่างตามที่ปรากฏดังในรูปที่ 1 ทำการตรวจวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น การทดลองระเบิดใต้น้ำดำเนินการทดลองทั้งสิ้น 9 ครั้ง โดยใช้ดินระเบิดแบบ T.N.T ขนาด 40 กิโลกรัม ตำแหน่งของการระเบิดอยู่ห่างจากเรือจำลอง 9.58 เมตร ที่ระดับความลึก 7.31 เมตร



รูปที่ 1 การทำ Shock Test ของบริษัท Intermarine

การทดลองนี้มีสิ่งที่น่าสนใจก็คือเกจวัดความเครียดที่ติดตั้งนี้จะติดตั้งแนบไปกับโครงสร้างของเรือ ทำให้ความเครียดที่วัดได้เป็นความเครียดตามแนวยาวของเรือ (Longitudinal Strain) และความเครียดตามแนวความโค้งเปลือกโครงสร้างตัวเรือ (Circumferential Strain)

2.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองระเบิดใต้น้ำที่เกิดขึ้นสามารถทำการตรวจวัดความเครียดได้ประมาณ 85% ของตัวเลขที่ควรจะตรวจวัดได้ ค่าความเค้นที่บริเวณต่าง ๆ จะคำนวณโดยอาศัยค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้นี้

2.2.1 ความเค้นตามแนวโค้งเปลือกเรือ (โครงสร้างตัวเรือ) (Circumferential Stress, σ_C)

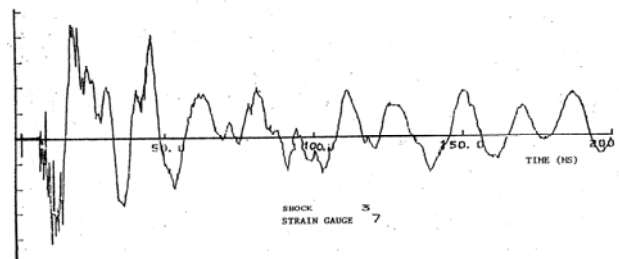
$$\sigma_C = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_C + \mu\epsilon_L) \quad (1)$$

2.2.2 ความเค้นตามแนวยาวของเรือ (Longitudinal Stress, σ_L)

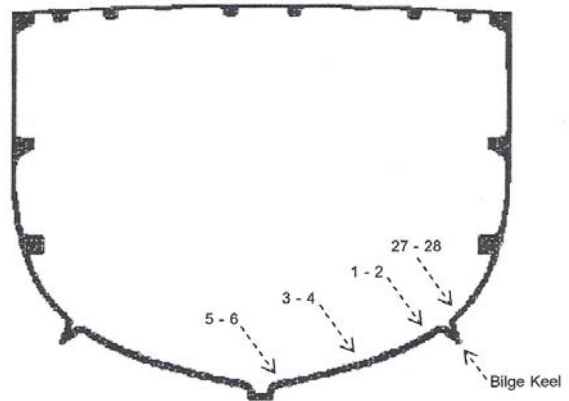
$$\sigma_L = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_L + \mu\epsilon_C) \quad (2)$$

เมื่อ E คือค่า Young Modulus, μ คือค่า Poisson's Ratio ของวัสดุ GRP ที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการ สำหรับค่า ϵ_C และ ϵ_L คือค่าความเครียดตามแนวความโค้งโครงสร้างตัวเรือ และความเครียดตามแนวยาวของเรือตามลำดับ

ค่าความเครียดที่ตรวจวัดได้ และความเค้นที่คำนวณได้ปรากฏดังในตารางที่ 1 เฉพาะเกจวัดความเครียดหมายเลข 1, 2, 3, 4, 5, 6, 27 และ 28 ที่ติดตั้งอยู่บริเวณเปลือกเรือใต้แนวน้ำเฉพาะการตรวจวัดครั้งที่ 3 - 7 เท่านั้น โดยค่าความเค้นที่คำนวณได้นี้มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะคล้ายปรากฏการณ์ของการสั่นสะเทือนแบบมีตัวหน่วงที่มี Amplitude ลดลงตามเวลา



รูปที่ 2 ลักษณะของความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงระเบิด [1]



รูปที่ 3 ตำแหน่งของเกจวัดความเครียด

ตารางที่ 1 ค่าความเค้น (MPa) ที่คำนวณจากตัวเลข Strain Gauge

Strain Gauge	การระเบิดครั้งที่				
	3	4	5	6	7
1 σ_L	-44.24	-46.71	-5.69	-50.81	NA
2 σ_C	-23.35	-23.35	46.79	-4.61	NA
3 σ_L	-39.83	-26.90	-25.40	-24.13	NA
4 σ_C	NA	-75.14	-75.14	-68.47	NA
5 σ_L	-15.45	NA	NA	-36.59	NA
6 σ_C	-29.43	NA	NA	1.20	NA
27 σ_L	-13.93	NA	NA	NA	-29.54
28 σ_C	-67.69	-38.26	NA	NA	-67.69

จากค่าในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณแถววัดความเครียดหมายเลข 1 – 2 จะมีค่าความเค้นตามแนวความยาวของเรือ หรือ σ_L อยู่ระหว่าง -5.69 ถึง -50.81 MPa ซึ่งเป็นค่าความเค้นตามแนวยาวของเรือที่มีค่าสูงสุดที่ตรวจวัดได้ และตามแนวทิศทางสัมผัสกับเปลือกเรือ หรือ σ_C อยู่ระหว่าง -4.61 ถึง 46.79 MPa สำหรับแถววัดความเครียดหมายเลข 3 - 4 มีค่า σ_L ระหว่าง -24.13 ถึง -39.83 MPa และ σ_C มีค่าระหว่าง 68.47 ถึง -75.14 MPa ซึ่งเป็นค่าความเค้นตามแนวทิศทางสัมผัสกับเปลือกเรือที่มีค่าสูงสุดที่ตรวจวัดได้ แถววัดความเครียดหมายเลข 5 – 6 มีค่า σ_L ระหว่าง -15.45 ถึง -36.59 MPa และ σ_C มีค่าระหว่าง -29.43 ถึง 1.20 MPa และแถววัดความเครียดหมายเลข 27 – 28 มีค่า σ_L ระหว่าง -13.93 ถึง -29.54 MPa และ σ_C มีค่าระหว่าง -38.26 ถึง -67.69 MPa นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตอีกว่าในการวัดค่านั้นบางครั้งแถววัดความเครียดจะไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ และจากการระเบิดหลายครั้ง ผลการวัดความเครียดที่จุดเดิมได้ผลไม่ใกล้เคียงกันเลย ดังเช่นในการระเบิดครั้งที่ 7 ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดค่าความเครียดที่ตำแหน่งอื่น ๆ ได้เลยนอกจากบริเวณแถวหมายเลข 27 – 28 เท่านั้น

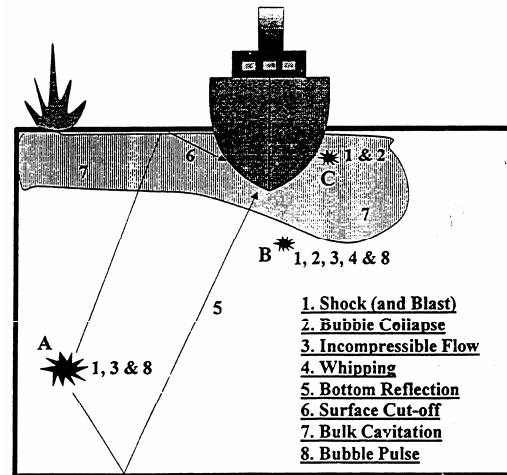
3. การวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดจากการระเบิดใต้น้ำโดยใช้วิธีการ Computer Simulation

จากสภาวะการในปัจจุบัน การตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นกับเปลือกเรือจากการทดลองระเบิดใต้น้ำจริงกระทำได้ยาก เนื่องจากต้องใช้เวลา และงบประมาณในการปฏิบัติสูง ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะทำการวิจัยโดยใช้ความรู้ทางด้านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น [2, 3, 4] ซึ่งผลของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของวิธีการ และแบบจำลองแล้วพบว่าให้ผลลัพธ์ที่มีค่าความถูกต้องสูง

3.1 วิธีการวิเคราะห์แบบ Fluid-Structure Interaction (FSI)

วิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่คำนวณผลที่เกิดขึ้นเริ่มตั้งแต่การระเบิดใต้น้ำของดินระเบิด การเคลื่อนที่ของแรงระเบิด (Shock Load) ที่เกิดขึ้นในของไหล (ในกรณีนี้คือน้ำทะเล) ความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อ Shock Load กระแทกกับโครงสร้างตัวเรือ และปรากฏการณ์

อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างโครงสร้างตัวเรือ และของไหลที่อยู่บริเวณโดยรอบนั้นเช่น Cavitation Cut-Off, Bulk Cavitation ฯลฯ ดังในรูปที่ 3 เรียกว่า Fluid-Structure Interaction (FSI)



รูปที่ 3 ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการระเบิดใต้น้ำ [7]

ดังนั้นในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ดังกล่าวต้องอาศัยหลักการในการวิเคราะห์ที่พิจารณาทั้งของไหล และโครงสร้างพร้อม ๆ กัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า Doubly Asymptotic Approximation (DAA) ซึ่งพัฒนาโดย Geers [5] ที่สามารถเขียนเป็นสมการของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้สองสมการคือสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างอันเป็นผลจากแรงจากของไหลคือ

$$[M_s]\{\ddot{X}\} + [C_s]\{\dot{X}\} + [K_s]\{X\} = -[G][A_f]\{P_i + P_s\} + \{f_d\} \quad (3)$$

และสมการที่สองซึ่งเป็น First-order doubly asymptotic approximation เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในของไหลคือ

$$[M_f]\{\ddot{P}_s\} + \rho C[A_f]\{\dot{P}_s\} = \rho C[M_f]\{[G]^T\{\dot{X}\} - \{U_i\}\} \quad (4)$$

เมื่อ $[M_s]$ คือ Mass Matrix ของโครงสร้างเรือทั้งลำ, $[C_s]$ คือ Damping Matrix, $[K_s]$ คือ Stiffness Matrix ของโครงสร้าง, $\{X\}$ คือ Displacement Vector ของโครงสร้าง, $[G]$ คือ Transformation Matrix ของ Node ที่ผิวเรือส่วนที่จมน้ำ (Wet Surface), $[A_f]$ คือ Area Matrix ของน้ำทะเลที่ติดกับ Wet Surface, $\{P_i\}$ คือ Incident Pressure Vector หรือ Shock Load, $\{P_s\}$ คือ Scattered Pressure Vector คือค่าของแรงดันของคลื่นที่กระทบตัวเรือแล้วสะท้อนกลับไปของไหล, $\{f_d\}$ คือ Forced Vector ที่กระทำกับตัวเรือส่วนที่พ้นน้ำ (Dry Surface) ปกติมีค่าเท่ากับศูนย์, $[M_f]$ คือ มวลของน้ำทะเลรอบ Wet Surface, ρ คือความหนาแน่นของของไหล, c คือความเร็วของเสียงในของไหล และ $\{U_i\}$ คือ Displacement Vector ของน้ำทะเลที่ติดกับ Wet Surface ในทิศทางเดียวกับการเข้ามาของ Shock Load ในการแก้สมการนั้นจะต้องทำการแก้สมการ (3) และ (4) ไปพร้อม ๆ กัน เพื่อหาค่าขนาดการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง $\{X\}$ และ Scattered Wave Pressure $\{P_s\}$ การวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการ DAA นี้จะต้องใช้ร่วมกับ Underwater Shock Analysis (USA) code [6] ซึ่งเป็น

ฐานข้อมูลเฉพาะทางด้านกระเบิดใต้น้ำเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากที่สุด อย่างไรก็ตามทั้งโปรแกรมที่มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ DAA และ USA Code นั้นมีราคาสูง และปกปิดเป็นความลับทำให้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถกระทำได้โดยคณะวิจัย ฯ นี้

3.2 วิธีการวิเคราะห์โดยใช้ Shock Load กระทำกับโครงสร้างโดยตรง

จากการศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น [7] พบว่าเมื่อมีแรงระเบิดได้นำมากระทบกับโครงสร้างตัวเรือนั้น แรง Shock Load ที่สูงที่สุดจะกระทำกับโครงสร้างตัวเรือ และส่งผลให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะ Transient response และแรงเค้นที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดในเสี้ยววินาทีที่ Shock Load กระทำกับตัวเรือ บรรดาของไหลที่อยู่โดยรอบ (ในกรณีนี้คือน้ำทะเล) จะไม่มีผลกระทบต่อค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นนี้ ดังนั้นการวิเคราะห์ในลักษณะ Fluid-Structure Interaction จึงไม่มีผลต่อความแม่นยำของผลการคำนวณมากนักหากเราสนใจเฉพาะค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้น โดยไม่สนใจปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกิดตามมา นอกจากนี้เรายังสามารถคำนวณแรง Shock Load ที่เกิดขึ้นจากการระเบิดด้วยสมการ Similitude [7] โดยอาศัยค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ

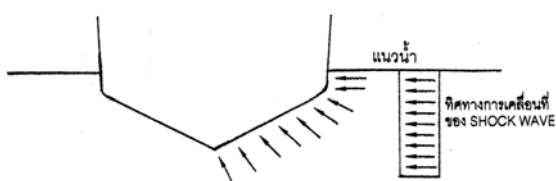
$$P_0 = 52.4(W^{1/3} / R)^{1.18} \quad (5)$$

$$\theta = 0.084(W^{-1/3})(W^{-1/3} / R)^{-0.23} \quad (6)$$

$$P = P_0 e^{-(t-t_0)/\theta} \quad (7)$$

เมื่อ W คือน้ำหนักของดินระเบิด (kg), R คือระยะห่าง (Stand-Off, m), P คือ ความดัน (MPa), P_0 คือความดันสูงสุด (Peak Pressure, MPa), θ คือ Decay time, t_0 คือเวลาที่ Shock Load เดินทางมาถึงโครงสร้างตัวเรือ, t คือเวลาที่เริ่มนับหลังจาก Shock Load เดินทางมาถึงแล้ว ตัวแปรสามตัวสุดท้ายมีหน่วยเป็น millisecond

จากสมการ (5) – (7) จะเห็นได้ว่าหากเราสามารถทราบน้ำหนักและระยะห่างของดินระเบิดแล้ว เราจะสามารถคำนวณแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิด ณ เวลาต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ลักษณะของ Shock Load (Wave Front) เมื่อเคลื่อนที่มาถึงเรือจะมีความโค้งเหมือนผิวของทรงกลม แต่ละจุดจะได้รับแรงไม่เท่ากัน แต่ในด้านการคำนวณความเค้นของโครงสร้างเรือ ความแตกต่างของเวลาที่ Shock Load เดินทางมาถึงเปลือกเรือแต่ละจุดมีค่าน้อยมาก ทำให้คณะทำงานตั้งเป็นสมมติฐานได้ว่า Shock Load เดินทางมาถึงพร้อมกัน Wave Front ไม่มีความโค้ง Amplitude ของ Wave Front มีค่าเท่ากันทั้งในแนวตั้ง และแนวระดับ เรียกว่า "Plane Wave" ทุก ๆ จุดของเปลือกเรือที่จมน้ำ และได้รับแรงกระแทกจาก Shock Load จะมีขนาดเท่ากัน และลดลงตามสมการ (7)



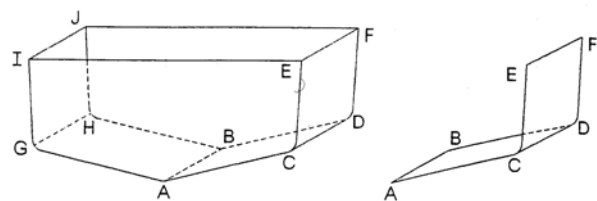
รูป 4 Loading สำหรับแบบจำลองวิเคราะห์ความเค้น

เมื่อนำค่าแรงดันสูงสุดนี้มากระทำกับโครงสร้างตัวเรือโดยไม่นำพฤติกรรม หรือผลกระทบจากน้ำทะเลที่อยู่โดยรอบโครงสร้างตัวเรือมาทำการคำนวณ และพิจารณาว่าเรือเป็นโครงสร้างที่อยู่บนบก และได้รับการเป็น Shock Load ที่คำนวณจากสมการ (5) – (7) ก็จะได้ค่าความเค้นที่มีค่าสูงกว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง [8] แต่เมื่อพิจารณาถึงความต้องการที่จะนำผลการวิเคราะห์ไปใช้งาน (ด้านปฏิบัติการทางทหาร) พบว่าค่าที่สูงกว่าความเป็นจริงนี้จะเป็น Safety Factor ให้อะกับการใช้งาน ซึ่งเป็นผลดีมากกว่าผลเสีย (ผลการคำนวณระบุว่าเรือแตกแต่ในความเป็นจริงที่ระยะดังกล่าวเรือจะยังปลอดภัยอยู่) ทำให้คณะวิจัยฯ ตัดสินใจนำวิธีการนี้มาใช้ในการคำนวณแทนการวิเคราะห์ในแบบ Fluid-Structure Interaction ดังนั้นสมการสำหรับการคำนวณจากสมการที่ (3) ก็จะต้องเพิ่มที่เกี่ยวกับของไหล (น้ำทะเล) ที่อยู่รอบ ๆ ตัวเรือออก และไม่นำสมการที่ (4) มาพิจารณา และเมื่อพิจารณาการตอบสนองแบบ Transient Response ก็ไม่ต้องนำค่าความหน่วงในสมการที่ (3) มาคิดทำให้ได้สมการสำหรับการเคลื่อนแบบ Forced Vibration ที่ว่า

$$[M_s]\{\ddot{X}\} + [K_s]\{X\} = \{P_i\} \quad (8)$$

3.2.1 แบบจำลองโครงสร้างตัวเรือ

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ทำการจำลองจากโครงสร้างเรือลำทำลายทุ่นระเบิดชุด ร.ล.ลาดหญ้า ซึ่งเป็นเรือที่ต่อจากบริษัท Intermarine เอง เรือชุดนี้มีโครงสร้างตัวเรือแบบเดียวกับโครงสร้างเรือชุด Gaeta ที่บริษัท Intermarine ใช้ในการทดสอบระเบิดใต้น้ำจริง คณะทำงานได้ทำการจำลองแบบเรือชุด ร.ล.ลาดหญ้า ตั้งแต่กราบเรือถึงกระดูกงูเพียงกราบเดียว ดังในรูปที่ 5 ด้านขวา เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งสองกราบดังในรูปที่ 5 ด้านซ้ายแล้วพบว่าด้านที่ไม่ได้รับแรงระเบิดโดยตรง (ด้านตรงข้าม) มีความเค้นน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับด้านที่ได้รับแรง Shock Load โดยตรง คณะวิจัยฯ จึงได้ทำการจำลองแบบเพื่อการวิเคราะห์เพียงครึ่งเดียว ทำให้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการคำนวณได้มาก



รูป 5 แบบจำลองของการวิเคราะห์โครงสร้างบริเวณห้องเครื่องเรือ

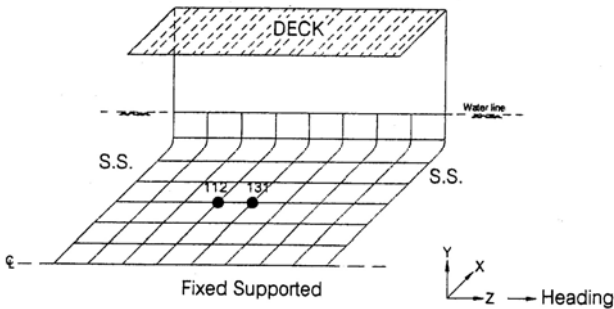
ในการจำลองแบบนี้คณะวิจัยฯ ใช้เอลิเมนต์แบบ Shell 93 ในการสร้างแบบจำลอง ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS Version 8 ในลักษณะ Transient Analysis และกำหนด Boundary Conditions ของแบบจำลองดังกล่าวไว้ดังในตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติทางกลจากการทดสอบ Tensile และ Flexural Test [9] ของวัสดุ GRP. ที่ใช้สร้างเรือชุด ร.ล.ลาดหญ้าพบว่าวัสดุมีย่านเป็น Plastic อยู่บนเส้นตรงเดียวกับย่าน Elastic จนสามารถประมาณได้ว่า Stress - Strain Curve ของวัสดุ GRP. ที่ใช้สร้างเรือชุด ร.ล.ลาดหญ้าเป็นเส้นตรงไปจนถึงจุด Ultimate Strength โดยมี

คุณสมบัติทางกลอื่น ๆ เป็นไปตามตารางที่ 3 และในการวิเคราะห์จะพิจารณาว่าวัสดุ GRP เป็น Isotropic Material

ตารางที่ 2 Boundary Conditions ของแบบจำลองในการวิเคราะห์

ด้าน	Boundary Condition
A – B	Fixed Support
A – C – E	Simply Supported
B – D – F	Simply Supported
E - F	Fixed Support



รูป 6 Boundary Condition ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุเปลือกเรือชุด ร.ล.ลาดหญ้า

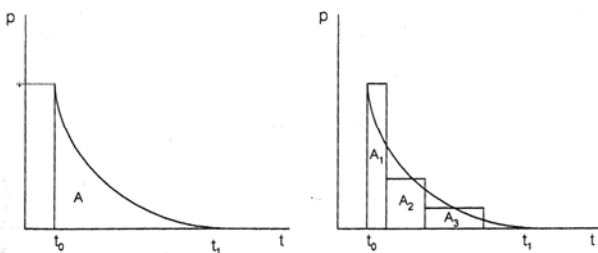
Tensile Strength (MPa)	158.012
Flexural Strength (MPa)	280.60
Young Modulus (MPa)	11,772.00
Poisson Ratio	0.13
Density (kg/m ³)	1526.00

3.2.2 Shock Load ที่เกิดขึ้นจากการระเบิด

จากการคำนวณ Shock Load ที่เกิดขึ้นพบว่าค่า Shock Load ที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงตามเวลาที่ผ่านไป เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงได้มีการแปลงค่าจากกราฟเส้นโค้งให้เป็นกราฟแท่งดังในรูปที่ 7 โดยให้พื้นที่ของกราฟทุกแท่งรวมกันมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความดัน กล่าวคือ Impulse ไม่เปลี่ยนแปลง

$$A = \int_{t_0}^{t_1} p(t)dt = A_1 + A_2 + A_3 \quad (9)$$

จากการคำนวณจะได้ว่าค่าแรงสูงสุด (Peak Pressure) มีค่าเท่ากับ 15.64 MPa ซึ่งจะใช้เป็น Shock Load ที่จะกระทำกับแบบจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป



รูปที่ 7 การแปลงกราฟเส้นโค้งเป็นกราฟแท่ง

4. ผลการวิเคราะห์จากวิธีการใช้ Shock Load กระทำกับโครงสร้างโดยตรง

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุด ณ ท้องเรือใต้แนวน้ำ บริเวณใกล้กับกระดูกงู หรือในส่วนของเรือจริงจะเกิดขึ้นบริเวณห้องเครื่องจักรก่อนไปทางท้ายเรือ ระดับของความเค้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ -104 MPa ในทิศทางตามแนวโค้งเปลือกเรือ ณ ตำแหน่งของเกจวัดความเค้นหมายเลข 27 – 28 นอกจากนั้นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นโดยมากจะเป็นความเค้นกด (Compressive Stress) ที่อัดโครงสร้างตัวเรือเข้าไปด้านในตัวเรือ ซึ่งเป็นไปตามลักษณะที่เกิดขึ้นจริง รวมทั้งค่าที่ได้จากตำแหน่งของเกจวัดความเค้นหมายเลข 1 – 2 และหมายเลข 27 – 28 ที่อยู่ระหว่าง Bilge Keel จะมีค่าสูงกว่าความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณอื่น ๆ ทั้งนี้อาจจะส่งผลเนื่องมาจากการที่โครงสร้างบริเวณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (มี Bilge Keel) ทำให้มีความเค้นบริเวณดังกล่าวมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ที่รูปทรงไม่เปลี่ยนแปลง

5. เปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นการทดลองระเบิดได้หน้า และการวิเคราะห์แบบใช้ Shock Load กระทำกับโครงสร้างโดยตรง

เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของบริษัท Intermarine พบว่าค่าทั้งสองมีลักษณะสอดคล้องกันไปในรูปแบบเดียวกัน กล่าวคือค่าสูงสุดที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้ รวมทั้งทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน ทั้งนี้ค่าความเค้นที่คำนวณได้สูงกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริงก็เป็นไปตามที่ได้คาดการณ์ไว้แล้ว เนื่องจากในการวิเคราะห์ไม่ได้พิจารณาปรากฏการณ์ในของไหลที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งค่าที่คำนวณได้นี้จึงมี Safety Factor ที่สามารถนำไปใช้ในทางการทหารได้ตามความต้องการ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบความเค้นจากการคำนวณ และการวัด (MPa)

Strain Gauge	การระเบิดครั้งที่					ผลการคำนวณ
	3	4	5	6	7	
1 σ_L	-44.24	-46.71	-5.69	-50.81	NA	-45.0
2 σ_C	-23.35	-23.35	46.79	-4.61	NA	-81.0
3 σ_L	-39.83	-26.90	-25.40	-24.13	NA	-20.6
4 σ_C	NA	-75.14	-75.14	-68.47	NA	-59.0
5 σ_L	-15.45	NA	NA	-36.59	NA	-25.5
6 σ_C	-29.43	NA	NA	1.20	NA	50.6
27 σ_L	-13.93	NA	NA	NA	-29.54	-44.5
28 σ_C	-67.69	-38.26	NA	NA	-67.69	-104.0

6. สรุปผล

จากผลการวิจัยพบว่าในการวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้างตัวเรือที่เกิดขึ้นจากการระเบิดได้หน้าสามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการสมมติให้โครงสร้างตัวเรือตั้งอยู่บนบก แล้วคำนวณแรง Shock Load ตามสมการ Similitude ให้มากระทำในลักษณะเป็น Plane Wave ได้โดยตรง และไม่ต้องนำพฤติกรรม หรือผลกระทบจากน้ำทะเลที่อยู่โดยรอบโครงสร้างตัวเรือมาทำการคำนวณ ซึ่งจะให้การวิเคราะห์ที่มี

ค่าสอดคล้องใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง สามารถลดขั้นตอน และความยุ่งยากของการคำนวณลงได้ในระดับที่น่าพอใจ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและพัฒนาการทหารกลาโหม สำหรับทุนวิจัย, Dr. John Brett Senior Research Scientist, Maritime Platform Division, สถาบันวิจัย และพัฒนาการทหารของ กระทรวงกลาโหมออสเตรเลีย (DSTO) สำหรับคำปรึกษา รวมทั้งข้อมูลต่าง ๆ, ศ.ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ, รศ.ดร.กฤษณิณี มณีรัตน์ แห่งคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ รศ.ดร.ปองวิทย์ ศิริโพธิ์ แห่งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับคำปรึกษาในการใช้งาน และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และขอขอบคุณในความร่วมมือของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาสำหรับโปรแกรม ANSYS ที่ใช้ในการวิเคราะห์

8. เอกสารอ้างอิง

1. Intermarine S.P.A., 1977, Report on shock tests on a mine hunter portion designed on scale 1:2/3, Contract No.10723, Sarzana.
2. Pfrang W.E. and Lutje H., 1989, Shock response of a mine hunter due to sea ground mine explosions – Numerical simulations. 337 – 351.
3. Gong S.W. and Lam K.Y., 1996, Transient response of floating composite ship section subjected to underwater shock. Composite Structures, Vol 46, 65 – 71.
4. Shin Y.S., 2004, Ship shock modeling and simulation for far-field underwater explosion, Computers & Structures Vol 82, 2211 – 2219.
5. Geers T.L., 1978, Doubly asymptotic approximations for transient motions of submerged structures, J. Acoustic Soc. Am. 64(5), 1500 – 1508.
6. De Runtz Jr. J.A., 1988, The underwater shock analysis code and its application.
7. Reid W.D., 1996, The response of surface ships to underwater explosions, Defence Science and Technology Organisation, Melbourne.
8. Brett J, 2002, Private Communication on shock wave response modeling: Discussion and advice on Fluid-Structure Interaction, Defence Science and Technology Organisation, Melbourne.
9. Intermarine S.p.A., 1997, Mechanical Properties of GRP Laminate; Hall 01, Sarzana.
10. วีรวัฒน์ วงษ์ดนตรี และคณะ, 2548, เอกสารวิจัยระยะปลอดภัย สำหรับเรือลำทำลายทุ่นระเบิด, สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหารกองทัพเรือ, นครปฐม.