

การวิเคราะห์สัญญาณความดันของเรือด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



นายเสถียรธรรม สุจริตวัฒน์สกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1651-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

121051872

ANALYSIS OF SHIP'S PRESSURE SIGNATURE BY FINITE ELEMENT METHOD

Mr.Sedthawatt Sucharitpwatskul

ศูนย์วิทยทรัพยากร

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

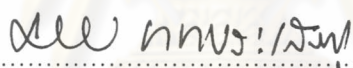
ISBN 974-17-1651-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สัญญาณความดันของเรือด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
โดย นายเสกฐาวรธ สุจริตภวัตสกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นาวาเอก ศาสตราจารย์ ดร.มนต์ชัย กาทอง


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(นาวาเอก ศาสตราจารย์ ดร.มนต์ชัย กาทอง)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

เสถียรธรรม สุจริตกวัตสกุล : การวิเคราะห์สัญญาณความดันของเรือด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. (ANALYSIS OF SHIP'S PRESSURE SIGNATURE BY FINITE ELEMENT METHOD) อ. ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เตชะอำไพ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : นาวาเอก ศาสตราจารย์ ดร.มนต์ชัย กาทอง 175 หน้า. ISBN 974-17-1651-6.

วิทยานิพนธ์นี้แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลแบบศักย์ที่สภาวะอยู่ตัวใน 2 และ 3 มิติ และการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อยที่สภาวะอยู่ตัวใน 2 มิติ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับปัญหาการไหลแบบศักย์ได้ประจักษ์ขึ้นจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการอนุรักษ์มวล ส่วนสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อยนั้น ได้ถูกประจักษ์ขึ้นจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับกฎการอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

การตรวจสอบความถูกต้องของไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำได้โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับปัญหาที่มีผลเฉลยแม่นยำ โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำของแต่ละปัญหา ขณะเดียวกันเพื่อให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ได้ประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติกับการวิเคราะห์ปัญหาการไหล โดยเทคนิคดังกล่าวจะปรับใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กในบริเวณที่มีความเปลี่ยนแปลงของความชันของความเร็วสูง และปรับใช้เอลิเมนต์ขนาดใหญ่ในบริเวณอื่น ๆ

จากนั้นได้นำไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์หาลักษณะการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของของไหลใต้ท้องเรือ พร้อมทั้งหาค่าสัญญาณความดันของเรือที่ระดับความลึกต่าง ๆ พบว่าลักษณะของค่าสัญญาณความดันของเรือที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับการไหลแบบศักย์และการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อยนั้นให้ผลที่สอดคล้องกัน

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4270357921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FINITE ELEMENT / INVISCID FLOW / VISCOUS FLOW / ADAPTIVE MESHING / PRESSURE SIGNATURE

SEDTAWATT SUCHARITPWATSKUL : ANALYSIS OF SHIP'S PRESSURE SIGNATURE BY FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : PROF. PRAMOTE DECHAUMPHAI, Ph.D. : PROF. MONCHAI KATHONG, Ph.D., 175 pp. ISBN 974-17-1651-6.

The finite element methods for two and three-dimensional, steady-state inviscid and viscous flows are presented. For the inviscid flow, the finite element equations were derived from the conservation of mass. For the viscous flow, finite element equations were derived from the set of partial differential equations that satisfy the law of conservation of mass and momentums.

The corresponding finite element computer programs were developed and verified by several examples that have exact solutions. In addition, the adaptive meshing technique is applied to increase the solution accuracy. The technique places small elements in the region of high velocity gradients, and at the same time, places larger elements in the other regions.

The finite element computer programs were then used to predict detailed flow behaviors past ship hull including the pressure signature at different depth levels. Pressure signature solutions obtained both the inviscid and viscous flow analyses are in good agreement.

Department Mechanical Engineering

Field of study Mechanical Engineering

Academic year 2002

Student's signature S. Sucharitwatskul.

Advisor's signature P. Dechaumhai.

Co-advisor's signature M. Kathong.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์และมีคุณค่าอย่างยิ่งต่องานวิจัยและการดำเนินชีวิตในอนาคต ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ นาวาเอก ศาสตราจารย์ ดร.มนต์ชัย กาทอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการทำงานวิจัยนี้

ขอพระขอบคุณกองทัพเรือไทยที่ให้การสนับสนุนด้านการเงินในการดำเนินการวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิโรจน์ ลิ่มตระการ อาจารย์นิพนธ์ วรรณโสภากย์ ตลอดจนสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การคำนวณทุกท่าน สำหรับคำแนะนำและกำลังใจในระหว่างการทำงานวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนมาโดยตลอด และขอขอบคุณ คุณฐิตารีย์ สุจริตภวัตสกุล ที่ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์นี้ อนึ่งประโยชน์และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตานุชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 สมมติฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	2
1.4 วิธีดำเนินการและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 สมการพื้นฐานของการไหล	4
2.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการอนุรักษ์มวล.....	4
2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการอนุรักษ์โมเมนตัม	7
2.3 สมการครอบคลุมสำหรับการวิเคราะห์การไหลของของไหล	13
2.3.1 การไหลแบบศักย์ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันการไหลใน 2 มิติ.....	13
2.3.2 การไหลแบบศักย์ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันศักย์ใน 2 มิติ	14
2.3.3 การไหลแบบศักย์ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันศักย์ใน 3 มิติ	15
2.3.4 การไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อยใน 2 มิติ.....	15
2.4 เงื่อนไขขอบเขตของการไหล	16
2.4.1 สำหรับการไหลแบบศักย์	16
2.4.2 สำหรับการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อยใน 2 มิติ.....	18

	หน้า
บทที่ 3	
การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
3.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	20
3.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 2 มิติ.....	23
3.2.1 การไหลแบบศักย์ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันการไหลใน 2 มิติ.....	24
3.2.2 การไหลแบบศักย์ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันศักย์ใน 2 มิติ.....	25
3.3 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 2 มิติ.....	26
3.4 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 3 มิติ.....	32
3.5 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 3 มิติ.....	33
3.6 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อยใน 2 มิติ.....	37
3.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อยใน 2 มิติ.....	41
3.8 การประยุกต์ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	49
บทที่ 4	
ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	53
4.1 ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลแบบศักย์.....	53
4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณ.....	53
4.1.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	56
4.2 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมสำหรับการไหลแบบศักย์.....	57
4.3 ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย.....	60
4.3.1 ขั้นตอนการคำนวณ.....	60
4.3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	63
4.4 ตัวอย่างการใช้โปรแกรมสำหรับการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อย.....	64
บทที่ 5	
การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	68
5.1 การไหลในท่อสำหรับการไหลแบบศักย์.....	68
5.2 การไหลผ่านท่อทรงกระบอก.....	71
5.3 การไหลผ่านทรงกระบอกรูปวงรี.....	75

สารบัญ (ต่อ)

ม

หน้า

5.4	การไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องมาจากความหนืด	78
5.5	การไหลในท่อสำหรับการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อย.....	81
5.6	การไหลหมุนวนในช่องสี่เหลี่ยม.....	85
5.7	การไหลระหว่างเพลากับแบร์ริง.....	87
บทที่ 6	เทคนิคการปรับเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ	91
6.1	หลักการของเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ.....	91
6.2	การนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ มาใช้กับปัญหาการไหล.....	96
6.3	โปรแกรมสำหรับแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ	99
6.4	โปรแกรมสำหรับคำนวณหาขนาดเอลิเมนต์.....	101
6.5	ตัวอย่างการใช้โปรแกรมสำหรับสร้างและหาขนาดของเอลิเมนต์.....	104
บทที่ 7	การวิเคราะห์สัญญาณความดันของเรือ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	113
7.1	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	113
7.2	การวิเคราะห์สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 2 มิติ	116
7.3	การวิเคราะห์สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 3 มิติ	123
7.4	การวิเคราะห์สำหรับการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อยใน 2 มิติ.....	125
บทที่ 8	บทสรุป ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	134
8.1	บทสรุป	134
8.2	ปัญหาที่พบในขณะที่ทำวิทยานิพนธ์	135
8.3	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	135
	รายการอ้างอิง.....	136

สารบัญ (ต่อ)

ญ

	หน้า
ภาคผนวก.....	138
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ POTEN2D	139
ภาคผนวก ข. รายละเอียดของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ POTEN3D	148
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ NAVIER2D	159
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบแสดงฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์มวล.....	5
รูปที่ 2.2 รูปแบบแสดงแรงต่าง ๆ ในทิศแกน x ที่กระทำบนก้อนของไหล ซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล เพื่อใช้ในการประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม.....	8
รูปที่ 2.3 เงื่อนไขขอบเขตของการไหลที่ติดกับผนัง.....	16
รูปที่ 2.4 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อย.....	19
รูปที่ 3.1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ.....	21
รูปที่ 3.2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมสำหรับปัญหาการไหลแบบศักย์ใน 2 มิติ.....	27
รูปที่ 3.3 การพิจารณาไหลคเวกเตอร์ที่ขอบใด ๆ ของการไหล.....	29
รูปที่ 3.4 โดเมนของการไหลที่จะนำมาใช้ในการคำนวณการไหลแบบศักย์.....	30
รูปที่ 3.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับฟังก์ชันการไหล ψ หรือฟังก์ชันศักย์ ϕ	31
รูปที่ 3.6 เอลิเมนต์สี่หน้าในสามมิติ.....	34
รูปที่ 3.7 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 6 จุดต่อสำหรับการไหลแบบหนืดโดยรวมความเฉื่อย.....	41
รูปที่ 4.1 แผนภูมิการทำงานของไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลแบบศักย์ คำในวงเล็บสี่เหลี่ยม [] ระบุชื่อโปรแกรมย่อยที่ทำการคำนวณนั้น.....	55
รูปที่ 4.2 การไหลในท่อสำหรับการไหลแบบศักย์ใน 2 มิติ.....	58
รูปที่ 4.3 แผนภูมิการทำงานของไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ NAVIER2D คำในวงเล็บสี่เหลี่ยม [] ระบุชื่อโปรแกรมย่อยที่ทำการคำนวณนั้น.....	62
รูปที่ 4.4 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการไหลแบบหนืดแต่ไม่อัดตัวระหว่างแผ่นเรียบ 2 แผ่น.....	65
รูปที่ 5.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหลในท่อใน 2 มิติ.....	69
รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบการกระจายฟังก์ชันการไหลที่ได้จากการคำนวณกับผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาการไหลในท่อ ณ ตำแหน่ง x ต่าง ๆ ใน 2 มิติ.....	69

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ฉ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของ ปัญหาการไหลในท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสใน 3 มิติ.....	70
รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบการกระจายฟังก์ชันศักย์ที่ได้จากการคำนวณกับผลเฉลย แม่นยำของปัญหาการไหลในท่อ ณ ตำแหน่ง y ต่าง ๆ ใน 3 มิติ	71
รูปที่ 5.5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขต ของปัญหาการไหลผ่านท่อทรงกระบอกใน 2 มิติ.....	72
รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบการกระจายฟังก์ชันศักย์ที่ได้จากการคำนวณกับผลเฉลยแม่นยำ ตรงรอบท่อทรงกระบอกของปัญหาการไหลผ่านท่อทรงกระบอกใน 2 มิติ	73
รูปที่ 5.7 การกระจายฟังก์ชันการไหลและความเร็วสำหรับปัญหา การไหลผ่านท่อทรงกระบอกใน 2 มิติ	73
รูปที่ 5.8 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของ ปัญหาการไหลผ่านท่อทรงกระบอกใน 3 มิติ	74
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบการกระจายฟังก์ชันศักย์ที่ได้จากการคำนวณกับผลเฉลยแม่นยำ ตรงรอบท่อทรงกระบอกของปัญหาการไหลผ่านท่อทรงกระบอกใน 3 มิติ	75
รูปที่ 5.10 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของ ปัญหาการไหลผ่านท่อทรงกระบอกรูปวงรีใน 2 มิติ.....	76
รูปที่ 5.11 การกระจายฟังก์ชันศักย์และความเร็วสำหรับการไหลผ่าน ท่อทรงกระบอกรูปวงรีใน 2 มิติ	77
รูปที่ 5.12 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของ ปัญหาการไหลผ่านท่อทรงกระบอกรูปวงรีใน 3 มิติ.....	78
รูปที่ 5.13 ปัญหาการไหลแบบหนืดโดยรวมความเค้นระหว่างแผ่นคู่ขนาน.....	79
รูปที่ 5.14 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการไหลแบบหนืด โดยรวมความเค้นระหว่างแผ่นคู่ขนาน	80
รูปที่ 5.15 ความเร็วที่จุดต่อที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นยำ.....	80
รูปที่ 5.16 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการไหลในท่อ.....	82
รูปที่ 5.17 ความเร็วที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลเฉลยแม่นยำ	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

๖

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.18 การกระจายของความดันที่คำนวณได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลเฉลยแม่นยำตรง	84
รูปที่ 5.19 ปัญหาการไหลหมุนวนในช่องสี่เหลี่ยม	85
รูปที่ 5.20 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ และเงื่อนไขขอบเขต	85
รูปที่ 5.21 เวกเตอร์ความเร็ว	86
รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบความเร็วที่คำนวณได้กับผลลัพธ์ จากระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง	87
รูปที่ 5.23 โดเมนการไหลของน้ำมันระหว่างเพลากับแบริง	88
รูปที่ 5.24 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับ โดเมนการไหลของน้ำมันระหว่างเพลากับแบริง (ภาพแสดงสเกลที่ต่างกัน ในแนวแกน x และ y)	89
รูปที่ 5.25 การเปรียบเทียบความเร็วที่คำนวณได้กับผลเฉลยแม่นยำตรง สำหรับปัญหาการไหลของน้ำมันระหว่างเพลากับแบริง	90
รูปที่ 5.26 การเปรียบเทียบการกระจายของความดันที่คำนวณได้กับผลเฉลยแม่นยำตรง ตลอดแนวการไหลของน้ำมันระหว่างเพลากับแบริง	90
รูปที่ 6.1 ค่าอนุพันธ์ของจุดต่อ i ที่มีเอลิเมนต์ล้อมรอบอยู่ 5 เอลิเมนต์	94
รูปที่ 6.2 ลำดับการทำงานของโปรแกรม BUILT.FOR	101
รูปที่ 6.3 ลำดับการทำงานของโปรแกรม SPACE.FOR	103
รูปที่ 6.4 ปัญหาการไหลผ่านช่องคู่ขนานที่มีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นโดยทันที (ภาพแสดงสเกลที่ต่างกันแนวแกน x และ y)	104
รูปที่ 6.5 ลักษณะการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นสำหรับปัญหาการไหล (ภาพแสดงสเกลที่ต่างกันแนวแกน x และ y)	108
รูปที่ 6.6 การกระจายตัวของความเร็ว เมื่อใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้น ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลภายในช่องคู่ขนานที่มีการเปลี่ยนแปลง พื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด (ภาพแสดงสเกลที่ต่างกันแนวแกน x และ y)	108
รูปที่ 6.7 ลักษณะการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการปรับขนาดเอลิเมนต์แล้ว สำหรับปัญหาการไหลภายในช่องคู่ขนานที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ หน้าตัดทันทีทันใด (ภาพแสดงสเกลที่ต่างกันแนวแกน x และ y)	112

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.8 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็ว เมื่อใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีการปรับขนาดเอลิเมนต์แล้ว ในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลภายในช่องคู่นานที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด (ภาพแสดงสเกลที่ต่างกันแนวแกน x และ y).....	112
รูปที่ 7.1 ลักษณะของปัญหาการหาค่าสัญญาณความดันใต้ท้องเรือ	113
รูปที่ 7.2 การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลของปัญหาการหาค่าสัญญาณความดันใต้ท้องเรือด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	114
รูปที่ 7.3 ลักษณะการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการหาค่าสัญญาณความดันใต้ท้องเรือ.....	115
รูปที่ 7.4 ปัญหาการหาค่าสัญญาณความดันใต้ท้องเรือ.....	116
รูปที่ 7.5 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้น สำหรับการไหลแบบศักย์.....	117
รูปที่ 7.6 การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้น.....	117
รูปที่ 7.7 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.6).....	118
รูปที่ 7.8 การกระจายตัวของความเร็วบริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.6).....	118
รูปที่ 7.9 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 สำหรับการไหลแบบศักย์.....	119
รูปที่ 7.10 การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 สำหรับการไหลแบบศักย์	119
รูปที่ 7.11 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.10).....	120
รูปที่ 7.12 การกระจายตัวของความเร็วบริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.10)....	120
รูปที่ 7.13 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 สำหรับการไหลแบบศักย์.....	121
รูปที่ 7.14 การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 สำหรับการไหลแบบศักย์	121
รูปที่ 7.15 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.14).....	122
รูปที่ 7.16 การกระจายตัวของความเร็วบริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.14)....	122
รูปที่ 7.17 ค่าสัญญาณความดันของเรือที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบศักย์ใน 2 มิติของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2.....	123
รูปที่ 7.18 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการไหลแบบศักย์	124

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ฅ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 7.19 ค่าสัมบูรณ์ของความดันของเรือที่ระดับความลึกต่าง ๆ บนระนาบ x-y เมื่อ z เท่ากับ 0	124
รูปที่ 7.20 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้น สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย.....	125
รูปที่ 7.21 การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้น สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย	126
รูปที่ 7.22 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.21).....	126
รูปที่ 7.23 การกระจายตัวของความเร็วบริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.21)....	127
รูปที่ 7.24 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย	127
รูปที่ 7.25 การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับ ขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย	128
รูปที่ 7.26 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.25).....	128
รูปที่ 7.27 การกระจายตัวของความเร็วบริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.25)....	129
รูปที่ 7.28 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย	129
รูปที่ 7.29 การกระจายตัวของความเร็วของรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการปรับ ขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อย	130
รูปที่ 7.30 ลักษณะของเอลิเมนต์บริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.29).....	130
รูปที่ 7.31 การกระจายตัวของความเร็วบริเวณท้องเรือ (บริเวณกรอบประในรูปที่ 7.29)....	131
รูปที่ 7.32 ค่าสัมบูรณ์ของความดันของเรือที่ระดับความลึกต่าง ๆ สำหรับการไหลแบบหนืด โดยรวมความเฉื่อยใน 2 มิติของการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2	131
รูปที่ 7.33 การเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของความดันของเรือที่ระดับความลึก 20 เมตร.....	132
รูปที่ 7.34 การเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของความดันของเรือที่ระดับความลึก 30 เมตร.....	132
รูปที่ 7.35 การเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของความดันของเรือที่ระดับความลึก 40 เมตร.....	133
รูปที่ 7.36 การเปรียบเทียบค่าสัมบูรณ์ของความดันของเรือที่ระดับความลึก 50 เมตร.....	133

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่
a	ความเร่ง
F_x	แรงภายนอกกระทำในแนวแกน x
F_y	แรงภายนอกกระทำในแนวแกน y
f_x	แรงวัตถุในแนวแกน x
f_y	แรงวัตถุในแนวแกน y
g	ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง
h	ความยาวของเอลิเมนต์
L	ความยาวขอบเอลิเมนต์
m	มวล
\hat{n}	เวกเตอร์หน่วยที่ตั้งฉากกับขอบ
n_x	ทิศทางโคไซน์ในแนวแกน x ของเวกเตอร์หน่วยที่ตั้งฉากกับขอบ
n_y	ทิศทางโคไซน์ในแนวแกน y ของเวกเตอร์หน่วยที่ตั้งฉากกับขอบ
n_z	ทิศทางโคไซน์ในแนวแกน z ของเวกเตอร์หน่วยที่ตั้งฉากกับขอบ
p	ความดัน
T_x	แรงรวมที่ผิวในทิศแกน x
T_y	แรงรวมที่ผิวในทิศแกน y
t	เวลา
u	ความเร็วในแกน x
v	ความเร็วในแกน y
V	ปริมาตรของเอลิเมนต์
w	ความเร็วในแกน z
x	ระยะในแนวระนาบ
y	ระยะในแนวตั้ง
z	ระยะในแนวลึก
Γ	ขอบของโดเมนการคำนวณ, ด้านของเอลิเมนต์
Ω	พื้นที่ของเอลิเมนต์, พื้นที่ของโดเมนการคำนวณ
ϕ	ฟังก์ชันศักย์

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

λ	ค่าเจาะจง
μ	ความหนืดพลศาสตร์
ν	ความหนืดจลนศาสตร์
ρ	ความหนาแน่น
σ	ความเค้นในแนวตั้งฉาก
τ	ความเค้นเฉือน
ψ	ฟังก์ชันการไหล



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย