บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยโครงสร้างเปลือกบาง (membrane structures) อย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นผลให้มีการใช้งานโครงสร้างชนิดนี้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในรูปแบบโครงหลังคาชั่วคราวอย่างง่ายหรือโครงสร้างถาวรที่มีความซับซ้อนและเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างหลัก

โครงสร้างเปลือกบางชนิดผ้าใบรับแรงดึงเป็นโครงสร้างเปลือกบางที่ใช้วัสดุประเภทผืนผ้า (fabric) ที่มีความหนาน้อยมากจึงสามารถรับแรงกระทำได้เฉพาะแรงดึงในแนวระนาบของผืนผ้าใบเท่านั้น โดยทั่วไปโครงสร้างประเภทนี้ต้องได้รับหน่วยแรงก่อนการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน ดังนั้นความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างนี้จึงขึ้นกับค่าหน่วยแรงดังกล่าวและมีความแตกต่างจากโครงสร้าง เหล็ก คอนกรีต และไม้ ซึ่งความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างเป็นหลัก ข้อได้เปรียบของโครงสร้างชนิดผ้าใบรับแรงดึงได้แก่ ความสวยงาม น้ำหนักเบาทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและขนส่ง ตลอดจนระยะห่างระหว่างฐานรองรับมากทำให้มีพื้นที่ว่างเพิ่มขึ้น เป็นต้น

ขั้นตอนในการออกแบบโครงสร้างเปลือกบางมี 3 ขั้นตอนคือ การหารูปแบบ (form finding) การวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุก (static load analysis) และการหาแบบตัด (cutting pattern generation) โดยทั่วไปการหารูปแบบจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะพื้นผิวของผ้าใบในสภาวะสมดุลภายใต้ค่าหน่วยแรงเริ่มต้น และเงื่อนไขบังคับที่กำหนด ส่วนการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกเป็นขั้นตอนการตรวจสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของรูปแบบโครงสร้างที่คำนวณได้ ทั้งนี้รูปแบบพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบางที่คำนวณได้จะต้องได้รับการตัดในลักษณะแถบในระนาบ (planar strips) เพื่อนำไปประกอบหรือติดตั้งในภายหลัง ซึ่งสามารถเรียกขั้นตอนนี้ว่าการหาแบบตัด หรืออีกนัยหนึ่งการหาแบบตัดคือการกำหนดชิ้นส่วนย่อยจากพื้นผิวขนาดใหญ่ของโครงสร้างในสามมิติให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตในระนาบสองมิติ

การศึกษาโครงสร้างเปลือกบางเริ่มต้นจากการศึกษาแบบจำลองทางกายภาพ โดยการเปรียบเทียบกับผิวของฟองสบู่ (Otto, 1967) จากนั้นได้มีการพัฒนาประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical methods) โดยแบ่งวิธีการหารูปแบบและการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกเป็น 2 วิธีคือ วิธีเมตริกซ์และวิธีเวกเตอร์ วิธีเมตริกซ์อาศัยการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น เช่น วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) (Argyris และคณะ, 1974) โดยคำนวณสติฟเนสของโครงสร้างจากชิ้นส่วนย่อยและอาศัยสมการสมดุล (equilibrium equation) และสมการการสภาพเข้ากันได้ (compatibility equation) โดยการเพิ่มขึ้น (incremental steps) จนเกิดการลู่เข้า (convergence) ของคำตอบ สำหรับวิธีเวกเตอร์นั้นอาศัยการหาตำแหน่งใหม่จากแรงคงค้าง (residual forces) แต่ละชิ้นส่วนย่อยโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาผลรวมของสติฟเนสของโครงสร้างยกตัวอย่างเช่น วิธีสลายการเคลื่อนที่ (dynamic relaxation method) (Barnes, 1977) และวิธีเกรเดียนต์สังยุคปรับส่วน (scaled conjugate gradient method) (Bucholdt และ McMillan, 1971) วิธีสลายการเคลื่อนที่ (dynamic relaxation method) เป็นการสมมติปัญหาทางสถิตศาสตร์ให้มีการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ การเคลื่อนที่เป็นการสั่นของโครงสร้างแบบหน่วง (damped structural vibrations) โดยใช้กฎข้อสองของนิวตัน (Newton's second law) ในรูปของไฟไนท์ดิฟเฟอร์เรนท์แบบกึ่งกลาง (centered finite difference form) สำหรับขั้นเวลา (time increments) ในพจน์ของพลังงานจลน์ (kinetic energy) และทำการคำนวณซ้ำจนกว่าการสั่นในโหมดต่างๆหายไปและระบบอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลในที่สุด

Schek (1974) อาศัยการสร้างพจน์เชิงเส้นของสมการสมดุลโดยการจำลองโครงสร้างด้วยโครงข่ายเคเบิ้ล (cable networks) และเรียกวิธีการดังกล่าวว่าวิธีความหนาแน่นของหน่วยแรง (force density method) โดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนแรงต่อความยาว (force density coefficient) ในแต่ละชิ้นส่วนย่อย การหารูปแบบของโครงสร้างด้วยวิธีนี้อาศัยสมการสมดุลที่จุดต่อโดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวของชิ้นส่วนย่อยรอบจุดต่อต้องมีค่าเท่ากัน Maurin และ Motro (1997) ได้พัฒนาวิธีหน่วยแรงพื้นผิว (surface stress density method) โดยได้แก้ไขปัญหาของวิธีเดิมที่ไม่สามารถกำหนดการกระจายตัวของหน่วยแรงของพื้นผิวโดยใช้ชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมและกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ในรูปหน่วยแรงต่อพื้นที่สามเหลี่ยม

สำหรับการหาแบบตัดของโครงสร้างเปลือกบางอาศัยการพิจารณาให้พื้นผิวที่ได้จากการรวมแถบย่อยเข้าด้วยกันควรเกิดการบิดรูป (distortion) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นผิวที่คำนวณได้จากขั้นตอนการหารูปแบบและการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกซึ่งการบิดรูปดังกล่าวสามารถลดค่า

เป็นศูนย์ได้สำหรับพื้นผิวแบบความโค้งเกาส์ (Gaussian curvature) มีค่าเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม สำหรับพื้นผิวโครงสร้างเปลือกบางส่วนใหญ่มีความโค้งเกาส์ไม่เป็นศูนย์ (double curve) และวิธีการหาค่าการบิดรูปน้อยที่สุดอาศัยตัวแปรในการควบคุมการบิดรูปได้แก่ ทิศทางและระยะห่างของเส้นตัด (cutting lines)

การหาแบบตัดของโครงสร้างชนิดผ้าใบรับแรงดึงสามารถแบ่งเป็นสองขั้นตอนได้แก่ การกำหนดเส้นตัดเพื่อแบ่งพื้นผิวออกเป็นแถบย่อย (cutting line definition) และการหาแบบตัดที่เหมาะสม (cutting pattern generation)

การกำหนดเส้นตัดซึ่งลากผ่านพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบางในสามมิติและแบ่งพื้นผิวออกเป็นแถบผ้าใบย่อยสามารถอาศัยการใช้ระนาบตัดผ่านพื้นผิวซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นรูปกล้วย (banana shape) แต่การใช้เส้นตัดลักษณะนี้จะส่งผลให้มีเศษวัสดุเหลือมาก กล่าวคือแถบผ้าใบที่นำมาตัดมีส่วนโค้งเว้ามากเกินความจำเป็น จึงมีการนำเส้นจีโอเดสิก (geodesic line) มาช่วยกำหนดเส้นตัด โดยที่เส้นจีโอเดสิกถูกกำหนดโดยสมการอนุพันธ์ในพจน์ของทิศทางและอยู่ในรูปเส้นตรงบนระนาบสัมผัสกับพื้นผิว กล่าวคือเส้นที่แสดงระยะทางสั้นที่สุดระหว่างจุดสองจุดบนพื้นผิว ซึ่งหากทำการแบ่งพื้นผิวด้วยเส้นจีโอเดสิกออกเป็นแถบย่อยจำนวนนับไม่ถ้วนจะเห็นว่าด้านข้างของแถบย่อยนั้นเป็นเส้นตรง ด้วยเหตุนี้การกำหนดเส้นตัดโดยใช้เส้นจีโอเดสิกจึงเป็นการประหยัดวัสดุ

การคำนวณหาเส้นจีโอเดสิกเพื่อกำหนดเส้นตัดของพื้นผิวสามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี (Grundig และคณะ, 1966) วิธีแรกคือ การคำนวณเส้นจีโอเดสิกพร้อมกับการหารูปแบบของโครงสร้าง โดยการเลือกชิ้นส่วนย่อยเคเบิ้ล (cable elements) ที่มีค่าแรงดึงสูงสุดเป็นเส้นจีโอเดสิก ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือเส้นจีโอเดสิกจะไม่ตัดผ่านชิ้นส่วนย่อยจึงไม่จำเป็นต้องจัดเรียงชิ้นส่วนย่อยใหม่ (remeshing) ส่วนข้อเสียคือการคาดเดาเส้นจีโอสิกก่อนได้รูปแบบของโครงสร้างที่สมบูรณ์อาจทำให้ได้แบบตัดที่ไม่ตรงความต้องการ วิธีที่สองคือการคำนวณเส้นจีโอเดสิกภายหลังทราบรูปแบบของโครงสร้างโดยการเลื่อนเคเบิ้ลสมมติไปบนพื้นผิวและเคเบิ้ลที่มีความยาวน้อยที่สุดหรือพลังงานศักย์น้อยที่สุดคือเส้นจีโอเดสิก วิธีการนี้ต้องพิจารณาให้เคเบิ้ลและพื้นผิวไปด้วยกันซึ่งมีความยุ่งยาก Ishii (1977) ได้เสนอวิธีการแบ่งพื้นผิวโดยใช้ชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมและคำนวณเส้นจีโอเดสิกจากการเลื่อนเส้นตรงบนระนาบสามเหลี่ยมบนด้านที่อยู่ติดกันของสามเหลี่ยมจนกระทั่งมุมตรงข้ามมีขนาดเท่ากัน

นอกจากคุณสมบัติของเส้นตัดดังที่กล่าวไปแล้วการกำหนดเส้นตัดต้องพิจารณาแนวการวางตัวของเส้นตัดประกอบด้วย ดังเช่นพื้นผิวรูปทรงพาราโบลาเชิงไฮเปอร์โบลาผลของการบิด (torsion) ของแถบย่อยที่ได้จากการกำหนดเส้นตัดในทิศทางที่ขนานกับเส้นความโค้งหลักของพื้นผิวจะมีค่าน้อยกว่าแถบย่อยที่ได้จากการกำหนดเส้นตัดในทิศทางขนานกับเส้นขอบของพื้นผิว (Wagner และคณะ, 2004)

การหาแบบตัดที่เหมาะสมภายหลังการแบ่งพื้นผิวออกเป็นแถบย่อยในสามมิติตามขั้นตอนข้างต้นเป็นการพิจารณาให้แถบย่อยดังกล่าวอยู่ในระนาบและคำนวณค่าชดเชยในส่วนที่ถูกยืดออก (flattening and compensation) วิธีง่ายที่สุดคือการจัดเรียงชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมที่ประกอบเป็นพื้นผิวให้อยู่ในระนาบเดียวกัน (simple trangulization method) โดยทำการลบจุดต่อ (node) ทั้งหมดยกเว้นจุดต่อบนเส้นตัดและทำการสร้างชิ้นส่วนย่อยขึ้นใหม่ อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวไม่ได้พิจารณาคุณสมบัติของวัสดุและรูปทรงภายในของแถบย่อย Tabarrok และ Qin (1993) ได้เสนอวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares minimization technique) ซึ่งเปลี่ยนความยาวของเส้นบนพื้นผิวสามมิติให้อยู่ในระนาบสองมิติโดยพิจารณาความยาวต่างกันน้อยที่สุดแต่ปัญหาที่ตามมาของวิธีดังกล่าวคือการกระจายค่าหน่วยแรงบนพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดรอยยับขึ้นภายใต้น้ำหนักบรรทุก Tsubota (1977) และ Kim และ Lee (2002) ได้เสนอวิธีการนำรูปร่างเริ่มต้นที่ได้จากรูปแบบพื้นผิวในสามมิติมาปรับปรุงการกระจายค่าหน่วยแรงโดยพิจารณาให้ค่าความเบี่ยงเบนของหน่วยแรงภายในพื้นผิวจากค่าหน่วยแรงสมมติน้อยที่สุด McCartney และคณะ (1999) และ Charlie และคณะ (2002) ได้เสนอวิธีพลังงานของหน่วยแรงซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การสะสมพลังงานโดยจากการกดพื้นผิวให้อยู่ในระนาบ และการปลดปล่อยพลังงานในแนวระนาบภายใต้ขอบเขตที่กำหนด

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการหาแบบตัดที่เหมาะสมของโครงสร้างเปลือกบางโดยการพิจารณาให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสามมิติเป็นตัวแปรต้น และการกระจัดในระนาบสองมิติเป็นตัวแปรตาม ทั้งนี้จะต้องเป็นไปตามสมการสมดุลและสมการสภาพเข้ากันได้

หอสมุดกลาง ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดขั้นตอนวิธีการหาแบบตัดที่เหมาะสมที่สามารถกำหนดค่าหน่วยแรงในโครงสร้างเปลือกบางโดยไม่ทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเดิมของโครงสร้าง โดยพิจารณาให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงเกิดจากการกระจัดในพื้นผิวสามมิติทำให้แบบตัดที่ได้สามารถกำหนดการกระจายค่าหน่วยแรงได้สม่ำเสมอยิ่งขึ้นโดยเฉพาะสำหรับโครงสร้างเปลือกบางที่มีความชันมาก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การหาแบบตัดที่เหมาะสมของโครงสร้างเปลือกบางอาศัยการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นโดยพิจารณาให้ความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย และอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหาสมการเป้าหมายในรูปกำลังสองน้อยที่สุดของค่าคลาดเคลื่อนในรูปหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างและหน่วยแรงเป้าหมายโดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. ในการคำนวณหารูปแบบของโครงสร้างเปลือกบางไม่พิจารณาน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกภายนอก

2. แกนของวัสดุมีคุณสมบัติเชิงฉากทั้งก่อนการเสียรูปและภายหลังการเสียรูป และวัสดุมีคุณสมบัติยืดหยุ่นเชิงเส้น

3. แบบจำลองของโครงสร้างประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยรูปสามเหลี่ยมแบบ 3 จุดต่อโดยแต่ละจุดต่อมีระดับขั้นเสรีเท่ากับ 3 สำหรับพื้นผิวโครงสร้าง และชิ้นส่วนย่อยรูปเส้นตรงแบบ 2 จุดต่อโดยแต่ละจุดต่อมีระดับขั้นเสรีเท่ากับ 2 สำหรับจำลองเคเบิ้ล

4. การวิจัยนี้ไม่มีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบข้อกำหนดของการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีเกรเดียนต์ในการหาแบบตัดที่เหมาะสมที่สุด ข้อกำหนดที่ใช้ในการวิจัยจึงใช้ข้อกำหนดเบื้องต้นดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 3