



โปรแกรมเพื่อแสดงภาพสนามความเค้นสองมิติเพื่อการพัฒนาการเรียนรู้และ ประสบการณ์ในการเรียนรายวิชากลศาสตร์วัสดุขั้นสูง

**Illustrative software for visualization of two-dimensional stress field to
enhance student learning and experience in course of
advanced mechanics of materials**

พิเชษฐ์ พินิจ

pichet.pin@kmutt.ac.th

อาจารย์ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้นำเสนอโปรแกรมสำหรับการแสดงภาพสนามความเค้นเชิงกล โปรแกรมนี้ถูกเขียนด้วยภาษา Visual C++ ซึ่งสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วยหลายโมดูล เช่น โมดูลการจำลอง โมดูลการวิเคราะห์ความเค้น และ โมดูลทางด้านการประมวลผลภาพ เป็นต้นในการเรียนในรายวิชากลศาสตร์วัสดุขั้นสูง ผู้เรียน (ระดับบัณฑิตศึกษา) จะได้รับชุดโปรแกรมดังกล่าว จากนั้นผู้เรียนจะใช้ชุดโปรแกรมจำลองภาพสนามความเค้นของปัญหาต่างๆ ตามที่กำหนดให้และทำการเปรียบเทียบกับลักษณะการเรียนแบบแผนเดิมกล่าวคือ คำนวณหาค่าความเค้นเฉพาะจุดโดยอาศัยสมการการแปลงความเค้นและ/หรือวงกลมโมร์ ผลจากแบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียนพบว่า ผู้เรียนมีความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ดี และ เห็นว่าโปรแกรมชุดนี้มีประโยชน์ต่อการเรียนการสอนไม่เฉพาะรายวิชากลศาสตร์วัสดุขั้นสูงเท่านั้นแต่ยังเหมาะสมกับรายวิชาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเค้น เช่น วิชากลศาสตร์วัสดุ วิชาการออกแบบเครื่องจักรกล วิชาการวิเคราะห์ความเค้นเชิงทดลอง ซึ่งผลการนำโปรแกรมนี้ไปใช้กับรายวิชาดังกล่าวจะได้รายงานให้ทราบในโอกาสต่อไป

คำสำคัญ: การเรียนรู้, สนามความเค้นสองมิติ, กลศาสตร์วัสดุขั้นสูง



ABSTRACT: This paper presents a program written under VC++ environment for visualizing the mechanical stress field. It works under Windows operating system. The program composes of several modules such as simulation, stress analysis, and image processing. In learning the course of Advanced Mechanics of Materials, each (graduate) student received such program from the instructor and used the program to simulate the stress fields of specific problems. Students were asked to make a calculation of stress at points of interest using the conventional techniques (use of stress transformation equation and/or Mohr's circle). The results of stresses obtained were then compared with those obtained from the simulation. After the appropriate contents were completed, the students were invoked to evaluate the program according to their satisfaction using a questionnaire. The feed back has been positive with some comments. The results of this evaluation addressed the positive effect the learning of the students.

KEYWORDS: Learning, 2D stress field, Advanced Mechanics of Materials

1. บทนำ

วิชากลศาสตร์ของแข็ง (Mechanics of Solids) เป็นวิชาหนึ่งในสาขากลศาสตร์ประยุกต์ที่มุ่งศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลของภาระภายนอกที่กระทำต่อวัตถุหนึ่งๆ กับความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัตถุนั้นๆ ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นนี้มีความสำคัญอย่างมากเกี่ยวกับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ในการแก้ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี คือ วิธีการทางด้านกลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials) หรือกลศาสตร์วัสดุขั้นสูง (Advanced Mechanics of Materials) และ ทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่น (Theory of Elasticity) [1]

กลศาสตร์วัสดุนั้นมุ่งสนใจเกี่ยวกับการกำหนดหาผลเฉลยโดยประมาณสำหรับปัญหาต่างๆ โดยตั้งอยู่บนข้อสมมติฐานจำนวนหนึ่งๆ ในขณะที่ทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่นจะกำหนดหาผลเฉลยสำหรับปัญหาเหล่านั้นโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ทางด้านคณิตศาสตร์ ดังนั้นสำหรับหลายๆ ปัญหาที่สนใจนั้นทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่นจะให้ผลเฉลยแม่นยำตรง ตัวอย่างเช่น ผลเฉลยของปัญหาแผ่นวงกลมรับแรงเข้มนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง และ ผลเฉลยของแผ่นเรียบบางขนาดใหญ่อยู่ภายใต้ความเค้นดึงแนวแกนเดียว [2] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการแก้ปัญหาทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงในเรื่องของหลักการ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วทั้งสองวิธีนี้ต่างก็เป็นส่วนเสริมซึ่งกันและกัน ทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่นจะอาศัยผลเฉลยโดยประมาณที่ได้จากกลศาสตร์วัสดุเพื่อนำไปสู่ผลเฉลยแม่นยำตรงในขณะที่กลศาสตร์วัสดุจะใช้ผลเฉลยแม่นยำตรงจากทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่นเป็นตัวช่วยในการตรวจสอบสมมติฐานหรือความเป็นไปได้ในการที่จะนำผลเฉลยโดยประมาณเหล่านี้ไปใช้งาน [3]

เนื่องจากทฤษฎีสถาปัตยกรรมยืดหยุ่นให้ผลเฉลยแม่นยำตรงโดยอาศัยหลักการทางด้านคณิตศาสตร์ ดังนั้นหากพิจารณาปัญหาที่มีความซับซ้อนมากๆ ก็จะทำให้ไม่สามารถกำหนดหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ การหลีกเลี่ยงปัญหานี้สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Methods) ตัวอย่างเช่น วิธีผลต่าง



สี่เหลี่ยม (Finite difference method) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเหล่านี้ช่วยให้การแก้ปัญหากระทำได้อย่างสะดวกมากขึ้นทั้งในเรื่องของความเร็วในการคำนวณและความถูกต้องของผลลัพธ์ อย่างไรก็ตาม ผู้ที่ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขต้องระลึกไว้เสมอว่าหลักการของวิธีนี้จะต้องสอดคล้องหลักการสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของทฤษฎีสภาพยืดหยุ่น ดังนี้ [2]

- สมการความสมดุลของสนามความเค้น
- สมการความเข้ากันได้ของสนามความเครียดหรือสนามการกระจัด และ
- สมการแผนแม่บทแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

นอกเหนือจากหลักการที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว สนามความเค้นและสนามความเครียดจะต้องสอดคล้องภาวะที่กระทำที่ขอบของวัตถุ ซึ่งเรียกว่า เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ดังนั้นหากผลเฉลยที่ได้จากวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมิได้สอดคล้องกับหลักการเหล่านี้แล้ว ผลเฉลยนั้นก็จะไม่มีความหมายใดๆ ทางกายภาพ

เนื่องจากว่าทฤษฎีสภาพยืดหยุ่นให้ผลเฉลยแม่นยำตรงโดยอาศัยหลักการทางด้านคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวข้างต้นจึงมีข้อคำถามเกิดขึ้นว่า จะทราบได้อย่างไรว่าผลเฉลยที่ได้จากทฤษฎีสภาพยืดหยุ่นมีความถูกต้องคำตอบของข้อคำถามนี้ก็คือ การตรวจสอบด้วยวิธีการเชิงทดลอง (Experimental methods) และหนึ่งในวิธีการเชิงทดลองที่นิยมใช้กันก็คือ วิธีโฟโตอีลาสติซิตี (Photoelasticity) ซึ่งลักษณะเด่นของวิธีนี้ก็คือความสามารถที่จะทำให้มองเห็นสนามความเค้นได้โดยง่าย

แม้ว่ารายวิชากลศาสตร์วัสดุหรือกลศาสตร์วัสดุขั้นสูงจะได้ถูกสอนในระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาตามลำดับในหลายๆ สถาบันการศึกษา แต่มนทัศน์เกี่ยวกับสนามความเค้นนับว่ายังไม่ค่อนักศึกษา ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่านักศึกษาส่วนใหญ่จะได้รับการถ่ายทอดจากผู้สอนให้วิเคราะห์ปัญหาเชิงจุด (Pointwise analysis) เท่านั้น ทั้งนี้โดยการกำหนดหาค่าประกอบความเค้น ความเค้นหลักและทิศทางการเค้นหลักเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องจักรกล สำหรับองค์ประกอบความเค้นนั้นสามารถคำนวณหาได้โดยง่ายจากสมการ

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{A}, \quad \sigma_{yy} = \frac{My}{I}, \quad \tau_{xy} = \frac{Tr}{J} \quad (1)$$

ความเค้นหลัก

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

และทิศทางการเค้นหลัก

$$\tan 2\phi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}} \quad (3)$$

พิจารณาสมการ (1) ถึง (3) จะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงจุดเท่านั้น ฉะนั้นหากต้องการค่าเหล่านี้ที่จุดอื่นๆ ก็จะต้องทำการคำนวณอีกครั้งตามจำนวนของจุดที่ต้องการทราบค่า เนื่องจากว่าระบบความเค้น



หนึ่งๆ ที่กำหนดให้สามารถนำไปเขียนแผนภาพวงกลมโมร์ได้ ดังนั้นจึงมีข้อคำถามตามมาว่า จะต้องใช้วงกลมโมร์เป็นจำนวนเท่าใดจึงจะเพียงพอต่อการอธิบายสนามความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุหนึ่งๆ ซึ่งคำตอบของคำถามข้อนี้ก็ถือเป็นจำนวนอนันต์ ทั้งนี้เนื่องจากว่าความเค้นเป็นปริมาณต่อเนื่องทั่วทั้งสนามนั่นเอง อย่างไรก็ตามด้วยวิธีโพโตอิลาสติกซิตีแล้ว สนามความเค้นนี้สามารถสังเกตเห็นได้โดยง่าย

ด้วยเหตุนี้ เพื่อเป็นการสร้างเสริมมโนทัศน์เกี่ยวกับสนามความเค้น บทความฉบับนี้จึงนำเสนอโปรแกรมช่วยในการจำลองสนามความเค้น การจำลองสนามความเค้นจะอาศัยหลักการจากทฤษฎีสภาพยืดหยุ่นและวิธีโพโตอิลาสติกซิตี ด้วยโปรแกรมนี้ผู้เรียนสามารถเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของความเค้นที่แท้จริงได้

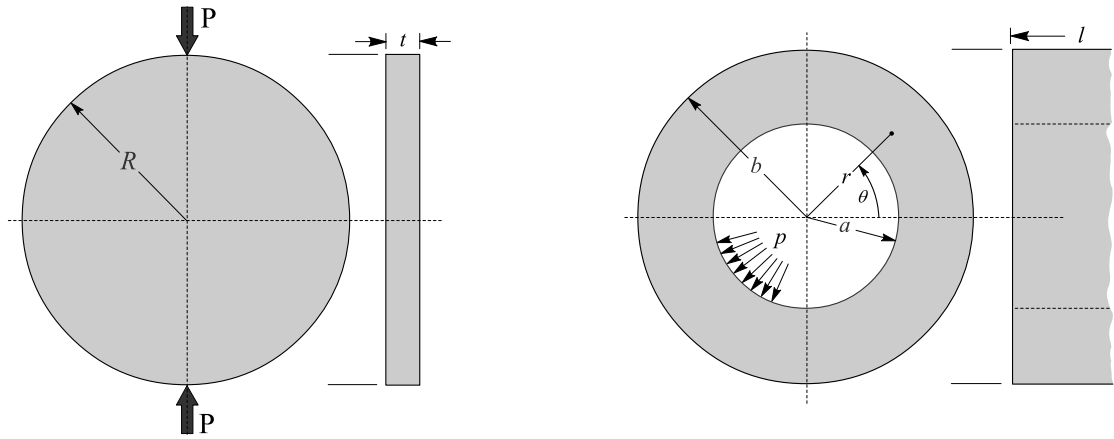
2. ทฤษฎีสภาพยืดหยุ่น

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทฤษฎีสภาพยืดหยุ่นเป็นทฤษฎีหนึ่งที่ถูกใช้กำหนดสถานะของความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์และสามารถให้ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหาบางปัญหาดังตัวอย่างเช่น ผลเฉลยของแผ่นจานวงกลมรับแรงเข้กดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (Circular disk under diametral compression) และ แผ่นวงแหวนกลมรับภาระความดันภายใน (Circular ring under internal pressure) (รูปที่ 1) ผลเฉลยของแผ่นจานวงกลมรับแรงเข้กดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง [2] และ ทรงกระบอกกลมผนังหนารับภาระความดันภายใน [1] นั้น สามารถเขียนได้ตามลำดับดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \\ \sigma_{yy} &= -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)^2x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2x}{r_2^4} \right]\end{aligned}\quad (4)$$

โดยที่ $r_1^2 = x^2 + (R-y)^2$ และ $r_2^2 = x^2 + (R+y)^2$ และ

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{a^2 p}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \\ \tau_{r\theta} &= 0\end{aligned}\quad (5)$$



รูปที่ 1 ปัญหาแผ่นวงกลมรัศมี R หนา t รับแรงเข้กด P ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางและปัญหาทรงกระบอกกลมผนังหนา
 รัศมีภายนอก b รัศมีภายใน a หนา l รับการะความดันภายใน p

3. วิธีโฟโตอิลาสติกซิติ

ในการจำลองนั้นตัวแปรสำคัญทางโฟโตอิลาสติกซิติที่จำเป็นต้องทราบค่าก่อนนั้นมีอยู่ 2 ตัวแปร คือตัวแปรไอโซคลินิก และ ตัวแปรไอโซโครมาติก สำหรับตัวแปรไอโซคลินิกนั้นสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (3) ในขณะที่ตัวแปรไอโซโครมาติกสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$N = \frac{t}{f_{\sigma}} \{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\tau_{xy}^2\}^{1/2} \quad (6)$$

โดยที่ f_{σ} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ริ้วความเค้นของวัสดุ ซึ่งกำหนดหาได้จากการปรับเทียบ (Calibration) ส่วนองค์ประกอบความเค้นนั้นสามารถกำหนดหาได้ด้วยสมการ (4) หรือ (5) เมื่อได้ค่าตัวแปรไอโซคลินิก (สมการ (3)) และตัวแปรไอโซโครมาติก (สมการ (6)) ก็จะสามารถคำนวณหาค่าความเข้มแสง $I(x, y)$ ซึ่งแสดงการกระจายตัวของความเค้นได้ ดังนี้

$$I(x, y) = k \sin^2 [\pi N(x, y)] \sin^2 [\phi(x, y) - \beta] + I_b(x, y) \quad (7)$$

โดยที่ k คือค่าความเข้มแสงโพลาไรซ์ β คือค่ามุมของแผ่นโพลาไรซ์ในชุดโพลาไรสโคป และ I_b คือค่าความเข้มแสงจากหลัง รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถดูได้ในเอกสารอ้างอิงหมายเลข [4]

4. วิธีการจำลอง

สำหรับวิธีการจำลองแบบนี้จะเริ่มจาก 1.) คำนวณหาค่าองค์ประกอบความเค้นทั้งสามโดยสมการ (4) หรือ (5) และแปลงให้อยู่ระบบพิกัดอ้างอิงจากตามความเหมาะสมโดยสมการการแปลงความเค้น 2.)



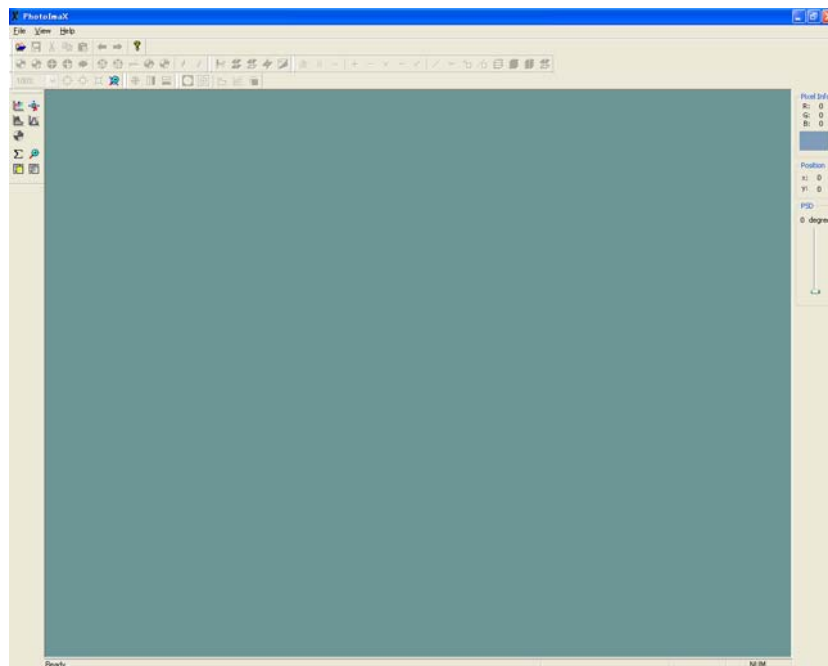
คำนวณหาค่าตัวแปรไอโซคลินิกและตัวแปรไอโซโครมาติกโดยอาศัยสมการ (3) และ (6) 3.) คำนวณหาค่าความเข้มแสงโดยสมการ (7)

5. โปรแกรมและผลการจำลอง

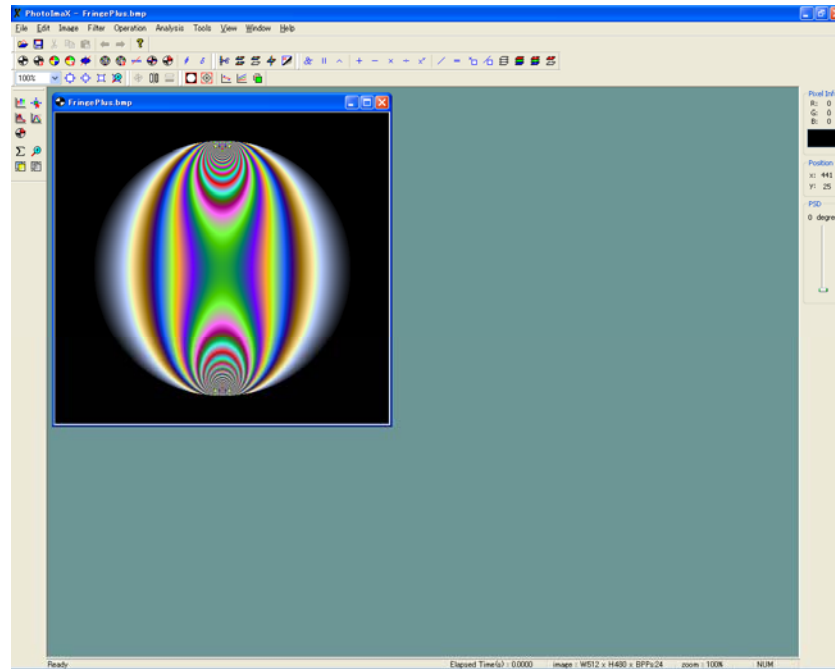
รูปที่ 2ก แสดงภาพของหน้าจอหลักของโปรแกรมในขณะที่ยังไม่มีการเปิดดูขึ้นมา ส่วนรูปที่ 2ข นั้นแสดงหน้าหลักของโปรแกรมพร้อมด้วยภาพของสนามขนาดความแตกต่างของความเค้นหลัก จะเห็นได้ว่ารายการคำสั่งบนแถบเมนูและแถบเครื่องมือมีลักษณะที่ต่างกัน

รูปที่ 3 แสดงภาพสนามความเค้นของแผ่นจานวงกลมรับแรงเข้มกดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปที่ 3ก แสดงภาพสนามความเค้นที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสองตัวแปร (สมการ (7)) รูปที่ 3ข เป็นภาพสนามความแตกต่างของค่าความเค้นหลัก ($\sigma_1 - \sigma_2$) ซึ่งคำนวณโดยใช้พจน์แรก $\sin^2 [\pi N(x, y)]$ ของสมการ (7) ส่วนรูปที่ 3ค นั้นเป็นภาพทิศทางของความเค้นหลักหรือตัวแปรไอโซคลินิกซึ่งคำนวณโดยใช้พจน์ที่สอง $\sin^2 2 [\phi(x, y) - \beta]$ ของสมการ (7)

พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 1 และ 3 จะเห็นได้ว่าภาพสนามความเค้นสอดคล้องกับความเป็นจริง กล่าวคือ ยิ่งใกล้บริเวณจุดที่แรงกระทำมากเท่าใดค่าความเค้นก็จะมีค่าสูงมากขึ้นเท่านั้น (ความถี่ของจำนวนริ้วหรือแถบสี) นอกจากนี้พึงสังเกตว่า รูปที่ 3ค ไม่ได้แสดงภาพสนามทิศทางของความเค้น แต่เป็นภาพที่เกิดขึ้นเมื่อมุม $\beta = 0$ เท่านั้น หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า บริเวณที่เกิดแบหรือริ้วสีดำนั้นทิศทางความเค้นหลักจะมีค่าเท่ากับศูนย์เทียบแกนในแนวนอน ดังนั้นหากต้องการทราบทั่วทั้งสนามก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่ามุม β ไปหลายๆค่า ตามที่ต้องการ

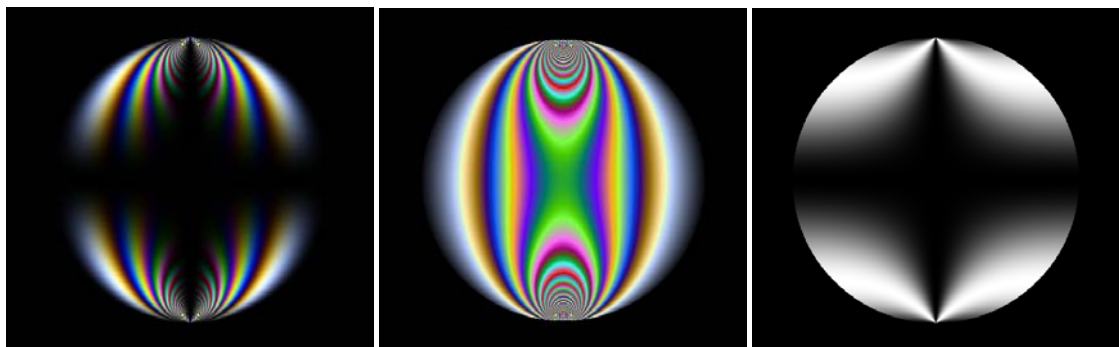


(ก)



(ข)

รูปที่ 2 หน้าจอหลักของโปรแกรมพร้อมด้วยแถบเมนูและแถบเครื่องมือ (ก) ก่อนการเปิดภาพใดๆ และ (ข) หลังการเปิดภาพ หรือการใช้คำสั่งการจำลองภาพสนามขนาดความแตกต่างของความเค้นหลัก



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3 ภาพสนามความเค้นของแผ่นจานวงกลมรับแรงเข้มกดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง (ก) สนามความเค้นที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสองตัวแปร (ข) สนามขนาดความแตกต่างของความเค้นหลัก และ (ค) ทิศทางความเค้นหลัก เมื่อ $\beta = 0$

รูปที่ 4 แสดงภาพสนามความเค้นของทรงกระบอกกลมผนังหนารับการระกดด้านภายใน รูปที่ 4ก แสดงภาพสนามความเค้นที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสองตัวแปร รูปที่ 4ข เป็นภาพสนามความแตกต่างของความเค้นหลัก $(\sigma_1 - \sigma_2)$ ส่วนรูปที่ 4ค นั้นเป็นภาพทิศทางของความเค้นหลักที่มุม $\beta = 0$

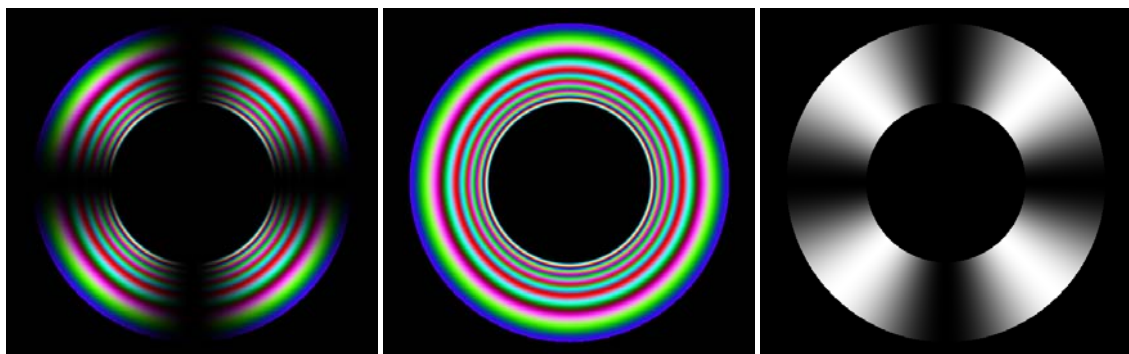
พิจารณารูปที่ 4ข จะเห็นได้ว่าความเค้นจะมีค่าสูงมากที่บริเวณผิวด้านในของทรงกระบอกซึ่งสังเกตได้จากความถี่ของจำนวนริ้วหรือแถบสี นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นจะมีค่าลดลงเมื่อตำแหน่ง r มีค่าเพิ่มขึ้นและความเค้นอาจมีค่าเป็นศูนย์ที่ผิวด้านนอกสุด สำหรับเงื่อนไขอื่น ๆ นั้นก็จะมีลักษณะเหมือนกับที่ได้อธิบายไปแล้วสำหรับแผ่นจานวงกลมรับแรงเข้มกดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง



6. การประเมินผลเบื้องต้น

หลังจากได้ทำการสร้างโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมได้ถูกนำไปประเมินผลในเบื้องต้น (Pilot test) โดยแจกจ่ายให้แก่ผู้เรียนที่เป็นนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาภายใต้โครงการความร่วมมือระหว่างวิทยาลัยเทคนิคหนองคายกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จำนวน 8 คน ซึ่งได้ลงทะเบียนเรียนในรายวิชาการศาสตร์วัสดุขั้นสูง ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2551 ในระหว่างการเรียนการสอนผู้เรียนจะใช้ชุดโปรแกรมที่ได้สร้างขึ้นนี้จำลองภาพสนามความเค้นของปัญหาที่ได้กล่าวข้างต้น (รูปที่ 1) และปัญหาอื่นๆ ตามที่กำหนดให้และทำการเปรียบเทียบกับลักษณะการเรียนแบบแผนเดิมกล่าวคือ กำหนดค่าความเค้นเฉพาะจุดโดยอาศัยสมการการแปลงความเค้นและ/หรือวงกลมโมร์ หลังจากนักศึกษาได้เรียนครบทุกหน่วยการเรียนที่เกี่ยวข้องกับสนามความเค้นแล้วก็ได้ทำแบบสอบถามความพึงพอใจ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือ ด้านการออกแบบ ด้านการใช้งาน และ ด้านการเรียนการสอน

ผลจากการวิเคราะห์แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียนด้วยสถิติอย่างง่าย (ค่าเฉลี่ย) ได้แสดงให้เห็นว่า ผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อโปรแกรมเฉลี่ยรวมแล้วอยู่ในเกณฑ์ดี โดยในส่วนของด้านการเรียนการสอนนั้นมีค่าเฉลี่ยสูงสุด ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่าสนามความเค้นที่ได้จากการจำลองทำให้ผู้เรียนมีความเข้าใจเกี่ยวกับสนามความเค้นดีขึ้น ในส่วนของข้อเสนอแนะนั้นผู้เรียนส่วนใหญ่เห็นตรงกันว่า ควรมีคู่มือการใช้งานโดยละเอียด นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะว่า รายการคำสั่งบนแถบเมนูควรมีรุ่นที่เป็นภาษาไทย



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4 ภาพสนามความเค้นของทรงกระบอกกลมผนังหนารับภาระความดันภายใน (ก) สนามความเค้นที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสองตัวแปร (ข) สนามขนาดความแตกต่างของความเค้นหลัก และ (ค) ทิศทางความเค้นหลัก เมื่อ $\beta = 0$

และ ปรับแต่งรูปภาพที่แสดงบนแถบเครื่องมือ (Tool bars) ให้มีความชัดเจนและสื่อความหมายมากขึ้นซึ่งจะทำให้การใช้งานหรือการเข้าถึงคำสั่งต่างๆ นั้นมีความสะดวกเพิ่มมากยิ่งขึ้น

7. บทสรุป

บทความนี้ได้นำเสนอโปรแกรมเพื่อการแสดงผลสนามความเค้นใน 2 มิติ โดยอาศัยหลักการทางทฤษฎีสถาปัตยกรรมและโพโตอิลาสติกซิตี โดยวัตถุประสงค์แล้วโปรแกรมนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อการใช้งานวิจัยทางด้านโพโตอิลาสติกซิตี อย่างไรก็ตาม ผลจากการประเมินเบื้องต้นในการนำโปรแกรมไปใช้เป็นส่วนเสริมหรือสนับสนุนการเรียนการสอนในรายวิชาการศาสตร์วัสดุขั้นสูงนั้นได้ชี้ให้เห็นว่า โปรแกรมช่วยเพิ่ม



ศักยภาพการเรียนรู้ของผู้เรียนในเรื่องของสนามความเค้น สำหรับการปรับปรุง แก้ไขโปรแกรมและการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อส่งเสริมหรือสนับสนุนการเรียนการสอนในรายวิชาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นและความเครียด เช่น รายวิชาการออกแบบเครื่องจักรกล การวิเคราะห์ความเค้นเชิงทศลง และ การประลองทางกลศาสตร์ประยุกต์นั้น จะได้รายงานผลให้ทราบในโอกาสที่เหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ugural, A.C. and Fenster, S.K. 2003. Advanced strength and applied elasticity, Prentice-Hall, West sussex.
- [2] Frocht, M.M. 1948. Photoelasticity, Vol. 2, John Willey and Sons, New York.
- [3] Dias da Silva, V. 2006. Mechanics and strength of materials, Eng. ed., Springer, Berlin.
- [4] พิเชษฐ พินิจ, ณัฐวัฒน์ พลอยทับทิม และ ศรีณัฐ มั่นพิสุทธิ, การจำลองแบบรื้อสนามความเค้นเพื่อวิเคราะห์ความเค้นในช่วงยึดหยุนด้วยแสง, ในการสัมมนาวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, หาดใหญ่, สงขลา, 8-9 พฤษภาคม 2551, บณชีดิรอม บทความเลขที่ PEC6OR110, หน้า 659-664