

โปรแกรมติดตามรอยร้าวสำหรับการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

Crack Monitoring Program for Fatigue Crack Growth Rate Test

ชาญเดช มังกรแก้ว, และ ผศ.ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*ติดต่อ: อีเมล Jirapong.K@Chula.ac.th โทรศัพท์: 662-2186634 โทรสาร: 662-2522889

บทคัดย่อ

บทความอธิบายการนำซอฟต์แวร์แล็บวิมาพัฒนาโปรแกรมติดตามรอยร้าวสำหรับการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า โปรแกรมคำนวณความยาวรอยร้าวจากคอมพลายเอนซ์ของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งนิยามว่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างความเครียดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของผิวชิ้นงานฯ ด้านหลัง กับภาระที่กระทำกับชิ้นงานฯ โครงสร้างของโปรแกรมประกอบด้วย 1) ส่วนตั้งค่าเริ่มต้น 2) ส่วนอ่านและบันทึกสัญญาณภาระและความเครียด 3) ส่วนนับรอบภาระ และ 4) ส่วนคำนวณความยาวรอยร้าวจากคอมพลายเอนซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะชิ้นงานทดสอบแบบ Compact Tension การทดสอบใช้ชิ้นงานฯ ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอน SA 516 Grade 70 และรับภาระล้าที่มีอัตราส่วนภาระ 0.1 สลับกับ 0.7 ทุก ๆ การเติบโตของรอยร้าวประมาณ 3 มม. ความยาวรอยร้าวที่วัดด้วยกล้องขยาย (หลังทดสอบเสร็จ) และที่คำนวณด้วยโปรแกรม ถูกใช้สำหรับประเมินความสามารถของระบบทดสอบ การวิเคราะห์พบว่า ระบบทดสอบสามารถวัดความยาวรอยร้าวได้แม่นยำ 5.2 % ของความยาวรอยร้าวเฉลี่ยตลอดความหนา และมีความละเอียดเท่ากับ 0.19 มม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในช่วงความยาวรอยร้าวเฉลี่ยๆ ตั้งแต่ 13 ถึง 30 มม.

คำหลัก: การติดตามรอยร้าว; สเตรเนจ; รอยร้าวล้า; แล็บวิมา

Abstract

The article described an application of LabVIEW software to develop a crack monitoring program for fatigue crack growth rate test. The program calculates a crack length from specimen's compliance that is defined as a ratio between strain at the midpoint of the specimen's back-face and load. The structure of a program is composed of 1) a part for configuring a test, 2) a part for acquiring and saving load and strain signals, 3) a part for counting loading cycles, and 4) a part for calculating a crack length from compliance, which is considered only a compact tension specimen. Test was conducted on specimen made of SA 516 Grade 70 carbon steel under fatigue load with load ratios alternated between 0.1 and 0.7 for every crack length increment about 3 mm. Crack length measured by a microscope (after test finished) and that calculated from a program were used in assessment of a test system. The analysis shows that the current test system can monitor a crack length with an accuracy of 5.2% of a thickness-averaged crack length, and has a resolution of 0.19 mm or better at 95% confidence for an average crack length from 13 to 30 mm.

Keywords: Crack monitoring; Strain gage; fatigue crack; LabVIEW

AMM-164

1. บทนำ

ในการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า (fatigue crack growth rate) ผู้ทดสอบต้องเก็บข้อมูลความยาวรอยร้าวที่จำนวนรอบภาระต่าง ๆ เป็นระยะ ๆ การติดตามรอยร้าวด้วยวิธีส่องกล้องขยายสามารถวัดได้เพียงความยาวรอยร้าวที่ผิวของชิ้นงานทดสอบซึ่งไม่เท่ากับความยาวรอยร้าวเฉลี่ยตลอดความหนาของชิ้นงาน เพราะขอบหน้าของรอยร้าวจะเป็นเส้นโค้ง การติดตามรอยร้าวโดยตรงยังใช้แรงงานของผู้ทดสอบอย่างมาก เพราะการทดสอบมักจะใช้เวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทดสอบในบริเวณใกล้ขีดเริ่ม ด้วยเหตุนี้ การวัดโดยอ้อม (indirect measurement) ซึ่งหมายถึงการคำนวณความยาวรอยร้าวจากปริมาณกายภาพที่สัมพันธ์กับความยาวรอยร้าวจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะสามารถพัฒนาเป็นระบบอัตโนมัติได้

การวัดความยาวรอยร้าวโดยอ้อมทำได้หลายวิธี [1] แต่วิธีที่นิยมคือ วิธีวัดคอมพลายแอนซ์ และวิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดที่ล้อมรอบรอยร้าว วิธีวัดคอมพลายแอนซ์ยุ่งยากน้อยกว่า และปลอดภัยมากกว่าวิธีหลัง เพราะวิธีวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าต้องป้องกันกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ชิ้นงาน รั่วไหลไปยังเครื่องทดสอบ

ตำแหน่งที่นิยมวัดคอมพลายแอนซ์ คือ ปากรอยร้าว (crack mount) แต่เนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวของผู้วิจัยใช้ได้กับการทดสอบที่มีความถี่ไม่เกิน 1 Hz หากจะนำมาใช้กับการทดสอบที่มีความถี่ในหลักสิบลีตซ์ ก็จะต้องปรับแก้ด้วยผลการสอบเทียบเชิงพลวัต [2] ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความไม่แน่นอนของผลการวัดความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงเลือกการวัดคอมพลายแอนซ์ที่ตำแหน่งอื่น

Deans และ Richard [3] เสนอการวัดคอมพลายแอนซ์ที่จุดกึ่งกลางของผิวชิ้นงานฯ ด้านที่ปลายรอยร้าวเคลื่อนที่เข้าหา หรือ “ผิวด้านหลัง (backface)” เขานิยามคอมพลายแอนซ์ในทอมของความเครียดซึ่งวัดได้ด้วยสเตรนเกจ วิธีนี้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพราะสเตรนเกจมี

ราคาถูกกว่าคลิปเกจมาก แต่มีความไว (sensitivity) และผลตอบสนองเชิงความถี่ค่อนข้างสูง วิธีนี้ใช้แพร่หลายกับชิ้นงานฯ มาตรฐานหลายแบบ [3-5] และเป็นหนึ่งในวิธีติดตามรอยร้าวที่มาตรฐาน ASTM [6] แนะนำ ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีนี้

การวัดโดยอ้อมทุกวิธีต้องการโปรแกรมประมวลผลสัญญาณ โปรแกรมของผู้ผลิตเครื่องทดสอบ [7] หรือโปรแกรมเชิงพาณิชย์ [8] สามารถกำหนดสภาวะทดสอบ และเก็บข้อมูลทดสอบได้ แต่ก็มีราคาสูง ในกรณีของผู้วิจัย ชุดควบคุมฯ สามารถกำหนดสภาวะทดสอบได้ ผู้วิจัยจึงต้องการเพียงโปรแกรมเก็บข้อมูลด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกการเขียนโปรแกรมเองเพื่อลดค่าใช้จ่าย และเขียนด้วยซอฟต์แวร์แล็บวิว (labVIEW) เพราะว่ามีเครื่องมือสำหรับสร้างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (user interface) วิเคราะห์ข้อมูล และเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์วัด จึงสะดวกกว่าการเขียนด้วยคอมพิวเตอร์ภาษาอื่น เช่น ภาษาซี เป็นต้น

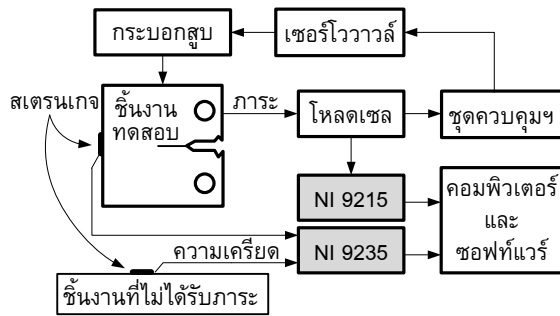
บทความนี้จะอธิบายแนวคิดในการเขียนโปรแกรมติดตามรอยร้าวล้าในชิ้นงานทดสอบแบบ Compact Tension C(T) ด้วยซอฟต์แวร์แล็บวิว และนำเสนอผลการประเมินโปรแกรม

2. ระบบทดสอบ

อุปกรณ์ในระบบทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 1 เซอร์โววาล์วรับสัญญาณจากชุดควบคุมฯ และควบคุมกระบอกสูบไฮดรอลิกให้สร้างภาระกระทำกับชิ้นงานฯ โหลดเซลล์วัดภาระที่ชิ้นงานฯ รับ และป้อนสัญญาณกลับไปชุดควบคุมฯ สเตรนเกจที่ผิวด้านหลังของชิ้นงานฯ วัดความเครียด ณ ตำแหน่งที่ติด สเตรนเกจบนชิ้นงานฯ ที่ไม่ได้รับภาระ (เป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบ) จะวัดความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สำหรับใช้ชดเชยผลของการผันแปรของอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ สัญญาณภาระและความเครียดจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยอุปกรณ์อ่านสัญญาณฯ แล้วส่งเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อ

AMM-164

วิเคราะห์และแสดงผลด้วยโปรแกรมที่เขียนด้วยซอฟต์แวร์แล็บวิว



รูปที่ 1 ระบบทดสอบ

รายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบทดสอบมีดังนี้

- 1) เครื่องทดสอบ ยี่ห้อ SaginoMiya ขนาด ± 30 ตัน
- 2) ชุดควบคุมเครื่องทดสอบ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 4826
- 3) ชิ้นงานทดสอบแบบ compact tension, C(T) กว้าง 50 มม. หนา 12 มม. ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน SA 516 เกรด 70 และผ่านการนอร์มัลไลซ์ วัสดุมีมอดูลัสยืดหยุ่น $E = 204$ GPa และอัตราส่วนปัวซอง $\nu = 0.3$
- 4) อุปกรณ์อ่านสัญญาณจากสเตรนเกจ ยี่ห้อ National instrument รุ่น 9235 ความละเอียด 24 บิต
- 5) การ์ดอ่านสัญญาณความต่างศักย์จากโพลดเซลล์ ยี่ห้อ National instrument รุ่น 9215 ความละเอียด 16 บิต หรือรุ่น 6024E ความละเอียด 12 บิต สำหรับ NI 9215 จะตั้งพิสัยการวัดไว้ที่ ± 5 โวลต์ ส่วน NI 6024E จะตั้งไว้ที่ ± 10 โวลต์
- 6) สเตรนเกจยี่ห้อ Kyowa ความต้านทาน 120Ω ความยาวเกจ 5 มม. และเกจแฟคเตอร์ 2.09

- 7) คอมพิวเตอร์ ซีพียู Core 2 1.8 GHz หน่วยความจำ 1 GB และซอฟต์แวร์แล็บวิว เวอร์ชัน 2012 ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 7 (64 บิต)

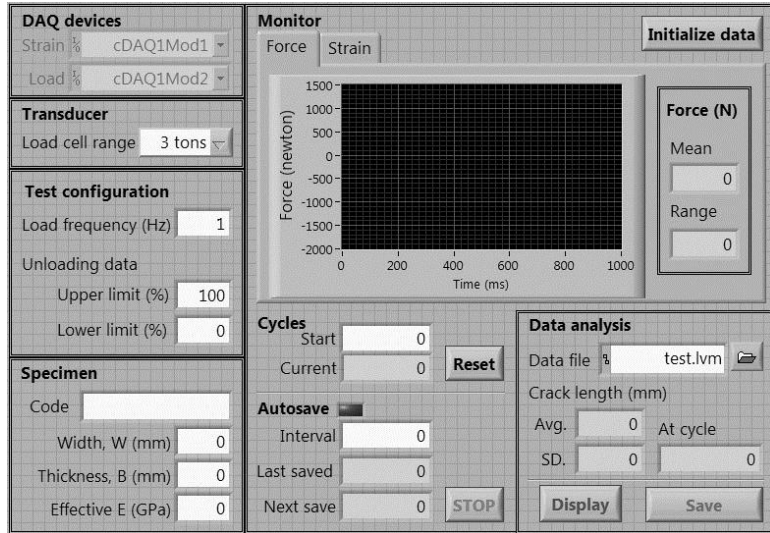
3. โปรแกรม

3.1 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้

ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 2 ข้อมูลบนหน้าจอแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ดังนี้

- 1) DAQ devices สำหรับระบุไดร์เวอร์ของอุปกรณ์อ่านสัญญาณจากสเตรนเกจและโพลดเซลล์
- 2) Transducer สำหรับกำหนดพิสัยของโพลดเซลล์ (ชุดควบคุม รุ่นนี้เลือกได้ 4 ค่า คือ ± 3 , ± 6 , ± 15 และ ± 30 ตัน)
- 3) Test configuration สำหรับระบุความถี่ของสัญญาณ (ภาระ) และกำหนดช่วงข้อมูล (ขอบเขตบนและล่าง) สำหรับคำนวณความยาวรอยร้าว
- 4) Specimen สำหรับระบุชื่อหรือรหัสชิ้นงานฯ ความกว้าง ความหนา และมอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิภาพ
- 5) Monitor สำหรับแสดงกราฟภาระและความเครียดระหว่างทดสอบ ปุ่ม "initialize data" ใช้ปรับค่าของสัญญาณให้เป็นศูนย์ก่อนเริ่มการทดสอบ
- 6) Cycles สำหรับระบุหมายเลขรอบตอนเริ่มการทดสอบและหมายเลขรอบปัจจุบัน ปุ่ม "Reset" ใช้ปรับหมายเลขรอบปัจจุบันให้เท่ากับหมายเลขรอบเริ่มต้น เนื่องจากโปรแกรมจะเริ่มนับรอบก่อนที่การทดสอบจะเริ่มต้น

AMM-164



รูปที่ 2 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้

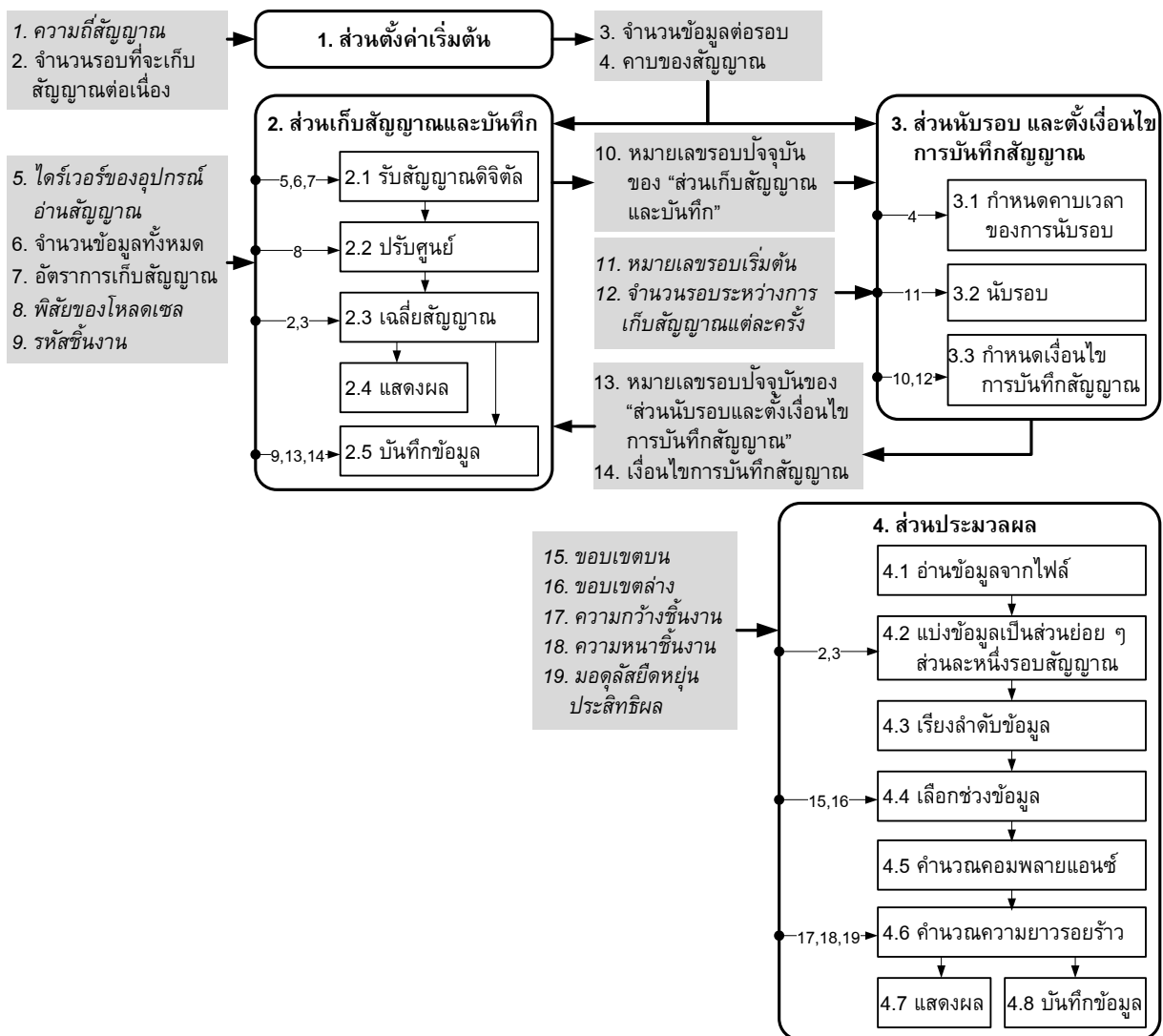
AMM-164

- 7) Autosave สำหรับระบุเงื่อนไขการบันทึกอัตโนมัติ Interval คือจำนวนรอบระหว่างการบันทึกข้อมูล Last saved และ Next save คือหมายเลขรอบขณะที่บันทึกสัญญาณครั้งล่าสุด และที่จะบันทึกครั้งถัดไป ตามลำดับ การบันทึกแต่ละครั้งจะเก็บสัญญาณ 5 รอบ แต่ว่าการเก็บแต่ละรอบจะเว้นช่วงสั้น ๆ เพื่อให้โปรแกรมบันทึกสัญญาณของรอบที่แล้วเสร็จก่อน ปุ่ม “stop” ใช้หยุดการทำงานของโปรแกรม
- 8) Data analysis สำหรับหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรอยร้าวจากข้อมูล ซึ่งเก็บซ้ำ 5 รอบ ในไฟล์ ปุ่ม “Display” ใช้ระบุสถานะการแสดงผลการคำนวณ ปุ่ม “Save” ใช้บันทึกข้อมูล ได้แก่ หมายเลขรอบที่เก็บข้อมูล และความยาวรอยร้าวเฉลี่ย เป็นต้น

3.2 ส่วนปฏิบัติการ

โครงสร้างของส่วนปฏิบัติการในรูปที่ 3 แบ่งออกเป็น 1) ส่วนตั้งค่าเริ่มต้น 2) ส่วนเก็บสัญญาณและบันทึก 3) ส่วนนับรอบและตั้งเงื่อนไขการบันทึกสัญญาณ และ 4) ส่วนประมวลผล โดยแสดงอยู่ในกรอบมูมเมน ภายในกรอบฯ แสดงขั้นตอนการทำงานพื้นที่ที่แรเงาแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ตัวอักษรเอียงใช้เน้นว่าเป็นข้อมูลที่ผู้ทดลองระบุ ตัวเลขบนเส้นตรงที่ชี้ไปยังขั้นตอนการทำงาน คือหมายเลขของข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนนั้น

โปรแกรมเริ่มทำงานที่ “ส่วนตั้งค่าเริ่มต้น” จากนั้นทำงานส่วนที่ 2 ถึง 4 คู่ขนานกัน และต่อเนื่องจากว่าจะมีคำสั่งให้หยุดการทำงาน รายละเอียดที่สำคัญของแต่ละส่วนจะอธิบายในหัวข้อย่อยต่อจากนี้



AMM-164

รูปที่ 3 แผนภาพเชิงแนวคิดแสดงโครงสร้างและการทำงานของโปรแกรม

AMM-164

3.2.1 ส่วนเก็บสัญญาณและบันทึก

โปรแกรมจะเก็บสัญญาณอย่างต่อเนื่อง แต่เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวน โปรแกรมจะนำสัญญาณ 5 รอบที่อยู่ติดกันมาเฉลี่ยเป็นสัญญาณตัวแทน ซึ่งใช้ในการแสดงผล (โดยพล็อตเทียบกับเวลา) หรือบันทึกลงไฟล์หากมีคำสั่งให้บันทึก

ผู้วิจัยพิจารณาการทดสอบที่ความถี่ภาระ 1 ถึง 20 เฮิร์ตซ์ และกำหนดว่าสัญญาณแต่ละรอบควรมีจำนวนข้อมูลอย่างน้อย 200 ค่า อุปกรณ์อ่านสัญญาณความถี่ที่ใช้มีอัตราการเก็บสัญญาณ (sampling rate) ในช่วง 10^3 ถึง 10^4 ค่าต่อวินาที ผู้วิจัยจึงกำหนดอัตราการเก็บสัญญาณ และจำนวนข้อมูลต่อรอบดังแสดงในคอลัมน์ที่ 2 และ 3 ของตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการเก็บสัญญาณ และจำนวนจุดข้อมูลต่อรอบ ที่ความถี่สัญญาณค่าต่าง ๆ

ความถี่ (เฮิร์ตซ์)	อัตราการเก็บสัญญาณ (ค่าต่อวินาที)	จำนวนข้อมูลต่อรอบ (ค่า)
1	1000	1000
≤ 5	2500	500
≤ 10	5000	500
≤ 20	5000	250

3.2.2 ส่วนนับรอบ

จำนวนรอบภาระที่ชิ้นงานฯ รับ คือค่าของตัวแปรที่บอกจำนวนการวนซ้ำของโครงสร้าง while loop ซึ่งมีคาบการทำงานเท่ากับคาบของสัญญาณที่เก็บ

ผู้วิจัยต้องการบันทึกไฟล์สัญญาณตัวแทน 5 รอบต่อเนื่อง แต่ว่า “ส่วนเก็บสัญญาณและบันทึก” ทำงานช้ากว่า “ส่วนนับรอบ” โปรแกรมจึงบันทึกสัญญาณไม่ทัน ผู้วิจัยแก้ปัญหาด้วยการเว้นช่วงเวลาระหว่างการบันทึกสัญญาณตัวแทนแต่ละครั้ง ช่วงเวลาที่เว้นในเทอมของจำนวนรอบแสดงอยู่ในตารางที่ 2 ดังนั้นหลังจากมีคำสั่งให้บันทึกสัญญาณ สัญญาณที่บันทึกครั้งที่ 5 จะล่าช้ากว่าการบันทึกครั้งแรกประมาณ 5 เท่าของจำนวนรอบฯ ในตาราง แต่จำนวนรอบที่ล่าช้าก็

ไม่มากนัก จึงถือว่าความยาวรอยร้าวเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวขณะนั้น

ตารางที่ 2 จำนวนรอบที่เว้นระหว่างการเก็บข้อมูลซ้ำเมื่อถึงหมายเลขรอบที่ผู้ใช้สั่งให้โปรแกรมบันทึกข้อมูล

ความถี่ (เฮิร์ตซ์)	จำนวนรอบระหว่างการบันทึกสัญญาณ
1	11
5	63
10	80
20	213

สัญญาณตัวแทนทั้ง 5 รอบ จะบันทึกในไฟล์เดียวกัน ชื่อไฟล์จะตั้งโดยอัตโนมัติจากระหัสชิ้นงาน และหมายเลขรอบที่โปรแกรมได้รับคำสั่งให้บันทึกข้อมูล

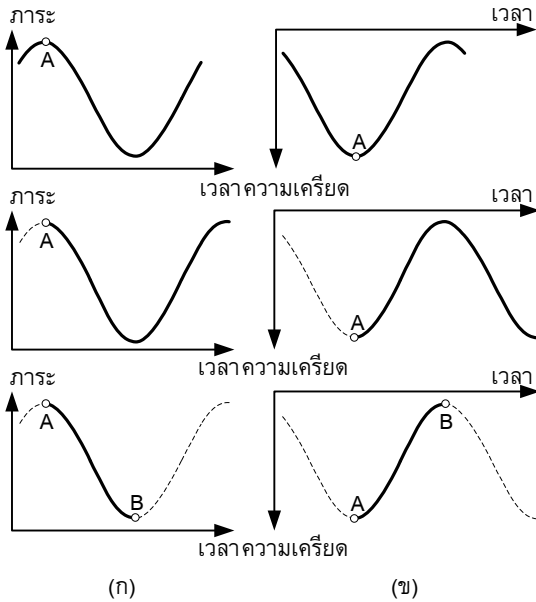
3.2.3 ส่วนประมวลผล

โปรแกรมจะอ่านข้อมูลจากไฟล์ ซึ่งมีข้อมูลสัญญาณตัวแทน 5 รอบ แล้วแบ่งข้อมูลเป็น 5 ชุด แต่ละชุดแทนสัญญาณหนึ่งรอบ ข้อมูลภาระและความเครียดแต่ละชุดจะถูกจัดเรียงให้มีเฟสตรงกัน แล้วเลือกข้อมูลช่วงปลดภาระตั้งแต่ขอบเขตล่างถึงขอบเขตบนมาคำนวณคอมเพลกซ์ และความยาวรอยร้าว ตามลำดับ ในที่นี้กำหนดให้ ความยาวรอยร้าวเฉลี่ย คือความยาวรอยร้าว ณ หมายเลขรอบที่โปรแกรมบันทึกสัญญาณครั้งแรก

รูปที่ 4(ก) และ 4(ข) แสดงหลักการจัดเรียงและเลือกข้อมูลภาระและความเครียด ตามลำดับ การจัดเรียงข้อมูลภาระเริ่มจากการค้นหาตำแหน่งสูงสุดของภาระ (จุด A) แล้วนำข้อมูลก่อนหน้าตำแหน่งนี้ไปต่อท้ายสำหรับข้อมูลความเครียด โปรแกรมจะค้นหาตำแหน่งต่ำสุด (จุด A) แล้วนำข้อมูลก่อนหน้าตำแหน่งนี้ไปต่อท้าย ต่อมาโปรแกรมจะค้นหาตำแหน่งต่ำสุดของภาระ และตำแหน่งสูงสุดของความเครียด (จุด B) แล้วเลือกข้อมูลตั้งแต่จุด A ถึงจุด B ซึ่งก็คือข้อมูลช่วงปลดภาระ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและภาระจะมีลักษณะดังรูป 4(ค) ต่อมาโปรแกรมจะคำนวณตำแหน่งขอบเขตล่างและขอบเขตบน ซึ่งเท่ากับร้อยละของจำนวนข้อมูลตั้งแต่จุด A ถึงจุด B แล้วเลือก

AMM-164

เฉพาะข้อมูลช่วงนั้น (จุด A' ถึงจุด B') เช่น มีข้อมูล 250 จุด ให้ขอบเขตล่างเท่ากับ 30% และขอบเขตบนเท่ากับ 85% จะได้ว่าจุด B' และจุด A' คือข้อมูลลำดับที่ 75 และ 212 ตามลำดับ



รูปที่ 4 หลักการจัดเรียงข้อมูลและเลือกข้อมูล สำหรับคำนวณคอมพลายแอนซ์ช่วงปลดภาระ

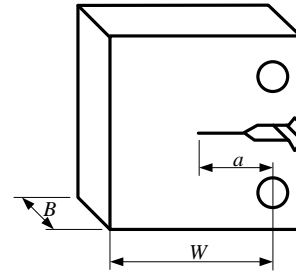
สำหรับชิ้นงาน C(T) (รูปที่ 5) โปรแกรมจะคำนวณนอร์มัลไลซ์คอมพลายแอนซ์ A จากสมการ

$$A = \left| \frac{E_{eff} \epsilon W B}{P} \right| \quad (1)$$

โดย E_{eff} คือมอดุลัสยืดหยุ่นประสิทธิภาพ, W และ B คือความกว้างและความหนาของชิ้นงาน ตามลำดับ, $|\epsilon/P|$ คือคอมพลายแอนซ์จากข้อมูลตั้งแต่จุด B' ถึงจุด A' ในรูปที่ 4(c) สูตรท้ายโปรแกรมจะคำนวณความยาวรอยร้าว a จากสมการต่อไปนี้ [4]

$$\frac{a}{W} = A_0 + A_1 U + A_2 U^2 + A_3 U^3 + A_4 U^4 + A_5 U^5 \quad (2)$$

โดย $U = 1/(\sqrt{A} + 1)$, $A_0 = 1.0033$, $A_1 = -2.35$, $A_2 = 1.3694$, $A_3 = -15.294$, $A_4 = 63.182$, และ $A_5 = -74.42$ สำหรับ $0.2 < a/W < 0.95$



รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบแบบ C(T) และตัวแปรอภิมิติ

4. การประเมินระบบทดสอบ

ผู้วิจัยเชื่อว่า ความสามารถของระบบติดตามรอยร้าวขึ้นกับฮาร์ดแวร์ของระบบทดสอบ ซึ่งได้แก่ เครื่องทดสอบ ชุดควบคุม อุปกรณ์อ่านสัญญาณ มากกว่าโปรแกรมที่พัฒนา และวัสดุทดสอบ ผลการประเมินที่จะกล่าวต่อไป จึงเป็นพฤติกรรมเฉพาะของฮาร์ดแวร์ในงานวิจัยนี้ มากกว่าโปรแกรมที่พัฒนา

การสร้างรอยร้าวบนชิ้นงานฯ ใช้ภาระล้าที่มีอัตราส่วนภาระ (load ratio, R) 0.1 สลับกับ 0.7 ทุก ๆ ครั้งที่รอยร้าวเติบโตประมาณ 3 มม. เพื่อให้เห็นขอบหน้าของรอยร้าวที่ความยาวต่าง ๆ ชัดเจน ซึ่งจะอำนวยความสะดวกในการวัดความยาวรอยร้าวด้วยกล้องขยาย ภาระสูงสุดที่ใช้คือ 1.1 ตัน (ตั้งพิสัยโหลดเซล ±3 ตัน) และความถี่ 10 เฮิรตซ์

4.1 ความละเอียด

ความละเอียดในที่นี้คือ การเปลี่ยนแปลงความยาวรอยร้าวที่น้อยที่สุดที่ผู้ทดลองเชื่อมั่นได้ว่ารอยร้าวเติบโตแล้ว

ให้ $\bar{a}_{current}$ และ \bar{a}_{next} คือความยาวรอยร้าวเฉลี่ยปัจจุบัน และถัดไป ตามลำดับ และให้ SD_a คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรอยร้าวที่วัด นิยามพารามิเตอร์ t ดังนี้

$$t = \frac{\bar{a}_{next} - \bar{a}_{current}}{SD_a / \sqrt{n}} \quad (3)$$

AMM-164

โดย n คือจำนวนข้อมูล (ในที่นี้ เท่ากับ 5)

ดังนั้น การเติบโตของรอยร้าว Δa อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ

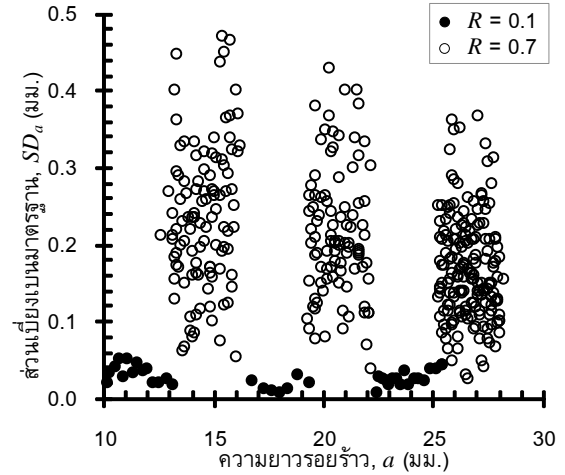
$$\Delta a \equiv \bar{a}_{next} - \bar{a}_{current} = \frac{SD_a}{\sqrt{n}} t_{95\%, n-1} \quad (4)$$

โดย $t_{95\%, n-1}$ คือค่าพารามิเตอร์ t ที่ความระดับความเชื่อมั่น 95% และองศาอิสระ $n - 1$

ค่า SD_a ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 6 จะเห็นว่า SD_a มีค่าผันแปรอยู่ในขอบเขตหนึ่ง และไม่ขึ้นกับ a อย่างมีนัยสำคัญ การทดสอบเพิ่มเติมที่ $R = 0.1, 0.3$ และ 0.5 ด้วยอุปกรณ์อ่านสัญญาณภาระที่มีความละเอียด 12 บิต ก็ให้แนวโน้มแบบเดียวกัน กล่าวคือ การผันแปรของ SD_a ไม่ขึ้นกับความยาวรอยร้าวอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ดี ค่าสูงสุดของ SD_a หรือ $SD_{a,max}$ ในรูปที่ 6 และที่ค่า R อื่น ๆ (คอลัมน์ที่ 1 และ 5 ของตารางที่ 3 ประกอบ) นั้นขึ้นกับ R อย่างมาก ผู้วิจัยจึงพิจารณา $SD_{a,max}$ สำหรับช่วงข้อมูลอื่น ๆ ได้แก่ 0% ถึง 100% (แทนด้วย 0/100), 20/80 และ 30/80 ผลลัพธ์แสดงอยู่ในคอลัมน์ที่ 2 ถึง 4 ของตารางที่ 3 ตามลำดับ จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าช่วงข้อมูล 0/100 ทำให้ $SD_{a,max}$ ขึ้นกับ R น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 แสดงปรากฏการณ์การปิดของผิวรอยร้าว (crack closure) แล้วก็ควรใช้ช่วงข้อมูล 20/80

ผู้วิจัยกำหนดค่า Δa จากค่า $SD_{a,max}$ เพื่อให้มั่นใจยิ่งขึ้น เมื่อแทน $SD_{a,max} = 0.20$ มม. ในสมการที่ (4) และใช้ $t_{95\%, 4} = 2.13$ แล้วจะได้ Δa หรือความละเอียดเท่ากับ 0.19 มม. หมายเหตุว่า Δa นี้ดีพอสำหรับการทดสอบเพราะมาตรฐานฯ [6] กำหนดที่ 0.5 มม. ต่ำสุด



รูปที่ 6 การผันแปรของ SD_a ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ (หมายเหตุ ใช้ช่วงข้อมูล 30% ถึง 85%)

ตารางที่ 3 ค่าสูงสุดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรอยร้าว

อัตราส่วนภาระ R	ค่าสูงสุดของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $SD_{a,max}$ (มม.)				อุปกรณ์เก็บสัญญาณ
	0/100	20/80	30/80	30/85	
0.1	0.11	0.21	0.16	0.05	16 บิต
	0.07	0.07	0.15	0.05	12 บิต
0.3	0.09	0.08	0.13	0.10	12 บิต
0.34	0.17	0.09	0.16	0.20	16 บิต
0.5	0.08	0.20	0.06	0.30	12 บิต
0.7	0.20	0.15	0.32	0.46	16 บิต

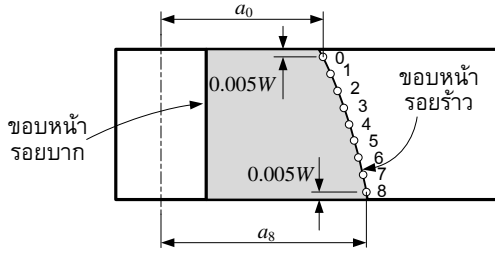
4.2 ความแม่นยำ

ความแม่นยำในที่นี้คือ ความแตกต่างระหว่างความยาวรอยร้าวที่วัดจริงกับที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์ ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยของรอยร้าวที่มีขอบหน้าโค้ง (รูปที่ 7) คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [9]

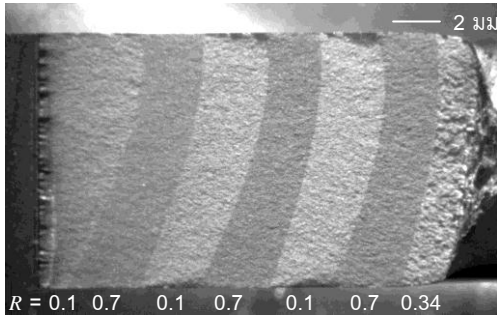
$$a_{avg} = \frac{1}{8} \left[\frac{1}{2} (a_0 + a_8) + \sum_{i=1}^7 a_i \right] \quad (5)$$

โดย a_0 ถึง a_8 คือความยาวรอยร้าวที่ตำแหน่ง 0 ถึง 8 ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยจากพื้นผิวแตกหักในรูปที่ 8 แสดงอยู่ในคอลัมน์ที่ 2 ของตารางที่ 4 คอลัมน์ที่ 3 ใน

AMM-164



รูปที่ 7 ตำแหน่งที่วัดความยาวรอยร้าว



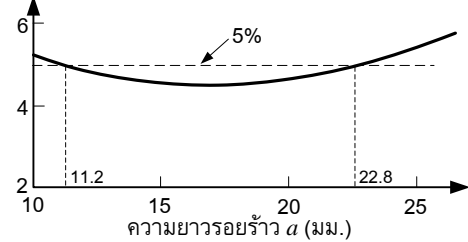
รูปที่ 8 พื้นผิวแตกหักของชิ้นงาน γ และ R แต่ละช่วง (ช่วงสุดท้ายใช้ภาระสูงสุดประมาณ 1.5 ตัน) ตารางนี้ คือผลการคำนวณความยาวรอยร้าว โดยใช้ช่วงข้อมูล 0/100 และมอดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล E_{eff} เท่ากับ 224 GPa ค่า E_{eff} ที่เหมาะสมนั้นขึ้นกับพารามิเตอร์ของการทดสอบ เช่น ชนิดวัสดุ ชนิดชิ้นงาน γ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน ASTM [6] แนะนำให้ใช้ค่าที่ทำให้คำนวณความยาวรอยร้าวได้ใกล้เคียงกับความยาวจริงมากที่สุด (ซึ่งปกติจะเป็นความยาวรอยร้าวสุดท้าย) แต่ไม่ต่างจากค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเกิน 10% ความผิดพลาดของความยาวรอยร้าว (คอลัมน์ที่ 4) ส่งผลให้การคำนวณค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range, ΔK) ผิดพลาดตามไปดังรูปที่ 9 แต่เนื่องจากมาตรฐาน ASTM [6] ยอมรับความคลาดเคลื่อนของ ΔK ที่ 5% ข้อมูลในช่วงความยาวรอยร้าว 11.2 ถึง 22.8 มม. จึงใช้สำหรับพล็อตกราฟ $da/dN-\Delta K$ ได้

ตารางที่ 4 ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยที่วัด และที่คำนวณ

อัตราส่วนภาระ	ความยาวรอยร้าว (มม.)		ความแตกต่าง (มม.)
	เฉลี่ย 9 จุด	คำนวณ	
0.1	13.85	13.14	0.71
	20.09	19.33	0.76
	26.04	25.40	0.64
0.7	16.98	16.10	0.88

	22.94	22.21	0.73
	28.89	28.14	0.75
0.34	30.68	29.90	0.78

%คลาดเคลื่อนของ ΔK



รูปที่ 9 เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนของ ΔK ที่ความคลาดเคลื่อนของความยาว 0.88 มม.

5. สรุป

โปรแกรมติดตามรอยร้าวในชิ้นงานทดสอบแบบ C(T) ด้วยวิธีวัดคอมพลายแอนซ์ที่ผิวด้านหลังสามารถทำงานร่วมกับระบบทดสอบได้ โดยวัดความยาวรอยร้าวได้แม่นยำ 0.88 มม. หรือ 5.2% ของความยาวรอยร้าวเฉลี่ย และมีความละเอียด 0.19 มม.

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานบริหารวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Shanmugham, S. and Liaw, P. (1996). Detection and monitoring of fatigue cracks. *ASM Handbook vol. 19*. ASM International, Ohio.

[2] ทรงพล เพิ่มทรัพย์ และจิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ (2550). การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า, *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21*, จังหวัดชลบุรี

[3] Deans, W.F. and Richards, C.E. A simple and sensitive method of monitoring crack and load in compact fracture mechanics specimens using strain gages. *J. of Testing and Eval.*, vol. 7, 1979, pp. 147-154.

AMM-164

- [4] Newman, J.C., Yamada, Y. and James, M.A. Back-face strain compliance relation for compact specimens for wide range in crack lengths. *Eng. Fract. Mech.*, vol. 78, 2011, pp. 2707-2711.
- [5] Huh, Y.H. and Song. J.H. Back-face strain compliance for the four-point bend specimen. *KSME Int. J.*, vol. 14 (3), 2000, pp.314-319.
- [6] ASTM E 647-05, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, ASTM Standard, vol. 03.01, 2006, pp. 647-691
- [7] MTS (2012), MTS TestSuite™ Multipurpose Software, USA, URL: <http://www.mts.com>, access on 24/5/2014.
- [8] Fracture Technology Associate, USA, URL: <http://www.fracturetech.com>, access on 24/5/2014.
- [9] ASTM E 1820-05, Standard test method for measurement of fracture toughness, ASTM Standard, vol. 03.01, 2006, pp. 1054-1101.