

การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า Development of a program for fatigue crack growth rate test

ทรงพล เพิ่มทรัพย์ และ ผศ.ดร. จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์: 662-2186604 โทรสาร: 662-2522889 อีเมล Jirapong.K@Chula.ac.th

Songpon Permsub, Asst. Prof. Dr. Jirapong Kasivitamnuy

Mechanical Engineering Department, Chulalongkorn University, 254 Phayathai Rd., Patumwan, Bangkok Thailand. 10330.

บทคัดย่อ

บทความนำเสนอ การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่าด้วยซอฟต์แวร์แล็บVIEW โปรแกรมสามารถใช้ในการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK แบบลด ΔK และแบบ ΔK คงที่ โปรแกรมประกอบด้วยโมดูลรับค่าสภาวะทดสอบ วิเคราะห์ผล แสดงผล บันทึกผล สร้างสัญญาณควบคุม และปรับแก้สัญญาณควบคุม การออกแบบโปรแกรมใช้ข้อแนะนำในมาตรฐาน ASTM E647 การประเมินโปรแกรมทำโดยการประยุกต์โปรแกรมกับการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่าของอะลูมิเนียมผสม 7075-T651 ในสภาพแวดล้อมอากาศ และเปรียบเทียบผลการทดสอบบางส่วนกับผลการทดสอบที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของผู้ผลิตเครื่องทดสอบ จากการทดสอบพบว่า โปรแกรมสามารถควบคุมภาระสูงสุดและต่ำสุดได้สอดคล้องกับค่าที่ต้องการ สำหรับการทดสอบทั้ง 3 แบบ นอกจากนี้ อัตราการเติบโตของรอยร้าวล่าที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 ก็สอดคล้องกับผลการทดสอบที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ดังนั้นจึงถือว่าโปรแกรมควบคุมทำงานได้ดี

Abstract

The paper presents a development of fatigue crack growth rate test program using a LabVIEW software. The program can be applied to the ΔK -increasing, ΔK -decreasing, and ΔK -constant tests. The program contains modules for obtaining the test conditions, analyzing data, displaying data, saving data, generating a control signal, and correcting the control signal. The program is designed using recommendations in ASTM E647 standard. Performance of the program was observed by applying the program to a fatigue crack growth rate test of an aluminium alloy 7075-T651 in air environment, and compare partial of the results with that obtained by using manufacturer's program. The experimental results showed that, in all kinds of tests, the program can controlled the maximum and minimum loads to the required values. Moreover, the fatigue crack growth rate at load ratio of 0.1 coincided with that obtained by using manufacturer's

program. Thus, the program can performed the test well.

1. บทนำ

ข้อมูลอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า (fatigue crack growth rate) da/dN จำเป็นสำหรับการคำนวณอายุการเติบโตของรอยร้าวล่าของชิ้นส่วนที่มีรอยร้าว การทดสอบหาข้อมูลนี้จำเป็นต้องวัดความยาวรอยร้าวที่ทำนรอบภาระต่าง ๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ โดยทั่วไปแล้วผลการวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง da/dN กับพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range) ΔK ชนิดของการทดสอบที่มาตรฐาน [1] แนะนำมี 2 แบบ เมื่อจำแนกด้วยเกณฑ์ของขนาดอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า คือ การทดสอบแบบเพิ่ม ΔK (ΔK -increasing test) หรือเรียกว่า การทดสอบแบบควบคุมภาระ ซึ่งเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการข้อมูล da/dN ตั้งแต่ 10^{-6} มม./รอบ ขึ้นไป และการทดสอบแบบลด ΔK (ΔK -decreasing test) ซึ่งเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการข้อมูล da/dN ต่ำกว่า 10^{-6} มม./รอบ นอกจากการทดสอบทั้งสองแบบนี้ ยังมี การทดสอบแบบ ΔK คงที่ (ΔK -constant test) ซึ่งนิยมใช้ในการศึกษาพฤติกรรมชั่วขณะ (transient) ของการเติบโตของรอยร้าวภายใต้ภาระแอมพลิจูดไม่คงที่ (variable amplitude loading) [2]

สำหรับการทดสอบแบบลด ΔK ตามมาตรฐาน และแบบ ΔK คงที่นั้น ในระหว่างการทดสอบจะต้องมีการปรับลดขนาดภาระที่ทำกับชิ้นงานทุก ๆ ครั้งที่มีความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นเท่ากับค่าที่กำหนด และต้องควบคุมอัตราส่วนภาระ (load ratio) R ให้คงที่ การปรับลดภาระนี้ควรเป็นไปอย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ เพื่อความสะดวกในการทดสอบ และเพิ่มความเชื่อถือได้ของข้อมูล อย่างไรก็ตาม การปรับลดภาระอัตโนมัตินั้นไม่สามารถทำได้โดยใช้เพียงชุดควบคุมเครื่องทดสอบความล่า แต่จะต้องใช้โปรแกรมควบคุมด้วย

จากเอกสารที่ผู้เขียนสืบค้นได้ [3-9] การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบแบบลด ΔK และควบคุม ΔK มีมากกว่า 30 ปีแล้ว ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน หลักการทำงานของโปรแกรมก็ยังคงเหมือนเดิม กล่าวคือ ระบบทดสอบต้องสามารถ 1) วัดความยาวรอยร้าวได้โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทดสอบ และ 2) คำนวณหาขนาดภาระค่าใหม่ที่ต้องการ

แล้วส่งไปควบคุมเครื่องทดสอบ แต่สิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงก็คือฮาร์ดแวร์ในระบบควบคุม และคอมพิวเตอร์สำหรับเขียนโปรแกรมนั้นได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ในปัจจุบัน ผู้ทดสอบสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของบริษัทผู้ผลิตเครื่องทดสอบ เช่น Instron [8] MTS [9] เป็นต้นได้ โปรแกรมเหล่านี้มีขีดความสามารถและความเชื่อถือได้สูง แต่ก็มีราคาสูงและถูกออกแบบมาเฉพาะเครื่องทดสอบของบริษัท ดังนั้น จึงมีโอกาที่โปรแกรมจะทำงานเข้ากับฮาร์ดแวร์ในระบบทดสอบที่มีอุปกรณ์ซึ่งสร้างขึ้นเองหรือการทดสอบชนิดพิเศษได้ไม่มากนัก ดังนั้น การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบขึ้นเองจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ผู้ใช้ต้องการทดสอบนอกเหนือจากสภาวะมาตรฐาน การพัฒนาโปรแกรมขึ้นเองยังช่วยลดค่าใช้จ่าย และสร้างความเข้าใจสำหรับการพัฒนาโปรแกรมอื่นต่อไป

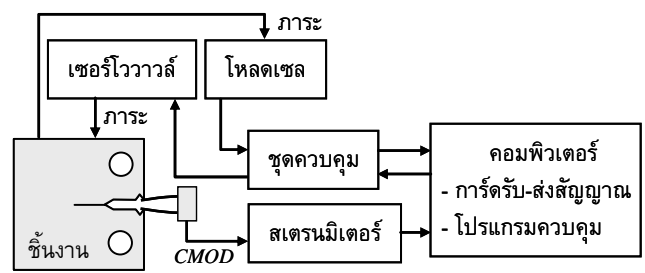
โปรแกรมแล็บวิว (LabVIEW) เป็นโปรแกรมได้รับความนิยมสูง เพราะว่ามีโมดูลสำเร็จรูปสำหรับใช้สร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) การวิเคราะห์ข้อมูล และการรับ-ส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์กับชุดควบคุม อย่างครบถ้วน [6] ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมจึงสะดวกกว่าการใช้คอมพิวเตอร์อื่น ๆ เช่น ภาษาซี เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอ การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวด้วยโปรแกรมแล็บวิว โดยเริ่มจากการอธิบายระบบทดสอบ และการออกแบบโครงสร้างและการทำงานของโปรแกรม จากนั้นจะนำเสนอผลการประยุกต์โปรแกรมกับการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวทั้ง 3 แบบ

2. ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ ประกอบด้วย อุปกรณ์ทำงานสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 1 จากรูป โปรแกรมควบคุมสร้างสัญญาณภาระส่งให้ชุดควบคุมชุดควบคุมส่งผ่านสัญญาณนี้ไปควบคุมการทำงานของเซอร์โววาล์วของเครื่องทดสอบเพื่อสร้างภาระให้ชิ้นงาน คลิปเกจ (clip gage) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ปากรอยร้าววัดระยะเคลื่อนตัวของปากรอยร้าว (crack mount opening displacement, *CMOD*) โหลดเซลล์ของเครื่องทดสอบตรวจวัดภาระที่กระทำกับชิ้นงาน แล้วส่งสัญญาณผ่านชุดควบคุมกลับไปโปรแกรมควบคุม สัญญาณ *CMOD* จากคลิปเกจ ถูกส่งไปที่สเตรนมิเตอร์ (strain meter) เพื่อขยายสัญญาณ แล้วจึงถูกส่งกลับไปโปรแกรมควบคุม

รายละเอียดของอุปกรณ์ในระบบทดสอบมีดังนี้ 1) เครื่องทดสอบความล้า ของบริษัท SaginoMiya ขนาดภาระ 0-30 ตัน 2) ชุดควบคุมของบริษัท Shimadzu รุ่น 4826 3) สเตรนมิเตอร์ ของบริษัท TechEquipment ขยายสัญญาณได้ 25 เท่า (ต่อวงจรแบบเต็มบริดจ์) 4) การรับ-ส่งสัญญาณ (data acquisition) ของบริษัท National instrument รุ่น 6024E ความจำแนกชัด (resolution) 12 บิต ติดตั้งใน



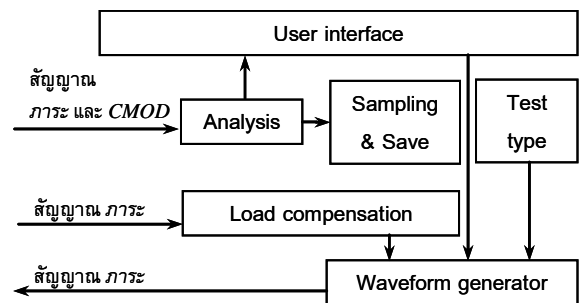
รูปที่ 1 ระบบทดสอบอัตโนมัติสำหรับหาการเติบโตของรอยร้าวคอมพิวเตอร์ Pentium 4 และทำงานร่วมกับโปรแกรมแล็บวิวเวอร์ชัน 7 และ 5) คลิปเกจแบบคานาคูเรียวที่สร้างขึ้นเอง [10]

3. การออกแบบโปรแกรม

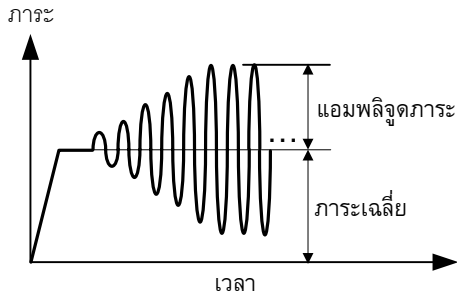
3.1 โครงสร้างและภาพรวมของการทำงาน

โปรแกรมประกอบด้วยโมดูลหลัก 6 โมดูล คือ 1) User interface 2) Analysis 3) Sampling & Save 4) Test type 5) Waveform generator และ 6) Load compensation

การทำงานของโมดูลข้างต้นแสดงอยู่ในรูปที่ 2 จากรูป โมดูล User interface รับข้อมูลทั่วไปของการทดสอบจากผู้ใช้ โมดูล Test type รับชนิดของการทดสอบและสภาวะทดสอบจากผู้ใช้ ข้อมูลจากโมดูลทั้งสองถูกส่งไปที่โมดูล Waveform generator เพื่อคำนวณขนาดสัญญาณภาระที่จะส่งไปยังชุดควบคุมเครื่องทดสอบ อย่างไรก็ตาม ในช่วงเริ่มต้นการให้ภาระกับชิ้นงาน โมดูล Waveform generator จะทำงานในลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ โมดูลจะส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมเพื่อตั้งชิ้นงานจากภาระศูนย์จนถึงภาระเฉลี่ยที่กำหนด หลังจากนั้นจึงส่งสัญญาณสร้างภาระล้าที่มีแอมพลิจูดภาระเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงขนาดที่กำหนด ตั้งแต่ตอนที่โปรแกรมเริ่มทำงาน สัญญาณภาระและ *CMOD* ของชิ้นงานจะถูกส่งเข้าโมดูล Analysis เพื่อคำนวณภาระส่วนติดต่อกับผู้ใช้ งาน โมดูล Sampling & Save ทำหน้าที่ควบคุมการบันทึกข้อมูลลงฮาร์ดดิสก์เป็นระยะ ๆ ตามเงื่อนไขที่ผู้ใช้งานระบุ โมดูล Load compensation ทำหน้าที่ปรับแก้ส่วนต่างของภาระที่กำกับชิ้นงานกับภาระที่ต้องการโดยอัตโนมัติ จนกระทั่งส่วนต่างอยู่ในขอบเขตที่กำหนด การปรับแก้มีความจำเป็นเนื่องจากการที่รอยร้าวบนชิ้นงานมีความยาวเพิ่มขึ้น คอมพลายแอนซ์ของระบบจะเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อความถูกต้องของภาระที่กระทำกับชิ้นงาน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของโมดูลหลักในโปรแกรมควบคุมการทดสอบ



รูปที่ 3 ภาระที่เท่ากับชิ้นงานในช่วงเริ่มต้นการทดสอบ

3.2 การทำงานของโมดูลหลัก

3.2.1 โมดูล User interface

หน้าที่ของโมดูลนี้ คือ 1) รับข้อมูลทั่วไปของการทดสอบ เช่น ชนิดและมิติของชิ้นงาน ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น รูปคลื่น ความถี่ภาระ เป็นต้น และ 2) แสดงผลการวิเคราะห์ เช่น จำนวนรอบภาระ ความยาวรอยร้าวขณะนั้น กราฟภาระ-เวลา กราฟ *CMOD* -เวลา เป็นต้น

3.2.2 โมดูล Analysis

โมดูลนี้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณภาระและสัญญาณ *CMOD* จากชนิดสัญญาณอะนาล็อกเป็นชนิดสัญญาณดิจิทัล นอกจากนี้ โมดูลจะวิเคราะห์ข้อมูลทั้งสองทุกรอบภาระ เพื่อหาคอมพลายแอนซ์ของชิ้นงาน และความยาวรอยร้าว ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความยาวรอยร้าวที่รอบภาระใด ๆ จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของความยาวรอยร้าวตั้งแต่รอบภาระนั้นถึงรอบภาระ 30 รอบ ถัดไป ความยาวรอยร้าวเฉลี่ยและจำนวนรอบภาระจะใช้สำหรับหาค่าความ ΔK และ da/dN

3.2.3 โมดูล Sampling & Save

หน้าที่ของโมดูลนี้ คือ ตรวจสอบเงื่อนไขการบันทึกข้อมูล และบันทึกข้อมูลลงฮาร์ดดิสก์ เงื่อนไขการบันทึกข้อมูลมี 2 แบบ คือ 1) เมื่อความยาวรอยร้าวเพิ่มขึ้นมากกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด และ 2) เมื่อถึงช่วงจำนวนรอบภาระ (cycle interval) ที่กำหนด เงื่อนไขการเก็บข้อมูลแบบหลังมีประโยชน์ในกรณีทดสอบแบบควบคุมภาระ และไม่มี การวัดข้อมูลระยะเคลื่อนตัวของชิ้นงาน

3.2.4 โมดูล Test type

หน้าที่ของโมดูลนี้ คือ รับค่าสภาวะทดสอบ ซึ่งขึ้นกับชนิดของการทดสอบ สำหรับการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK ผู้ใช้ต้องป้อนค่าภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระ สำหรับการทดสอบแบบ ΔK คงที่ ผู้ใช้จะป้อนค่า ΔK และอัตราส่วนภาระ สำหรับการทดสอบแบบลด ΔK ผู้ใช้จะป้อนค่า ΔK เริ่มต้น อัตราส่วนภาระ และค่าคงตัวที่ควบคุมอัตราการปรับลดค่า ΔK

ในกรณีของการทดสอบแบบลด ΔK และแบบ ΔK คงที่ โมดูลนี้จะมีหน้าที่เพิ่มเติม คือ 1) คำนวณพิสัยภาระที่จะปรับลดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของรอยร้าว และ 2) คำนวณภาระเฉลี่ยที่ทำให้ อัตราส่วนภาระคงเดิม มาตรฐาน ASTM E647 แนะนำว่าพิสัยภาระที่ความยาวรอยร้าวใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = \frac{\Delta K_0 B \sqrt{W} \exp[C(a - a_0)]}{f\left(\frac{a}{W}\right)} \quad (1)$$

โดย ΔP คือ พิสัยภาระ

ΔK_0 คือ พิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นตอนเริ่มต้น

B คือ ความหนาชิ้นงาน

W คือ ความกว้างชิ้นงาน

a คือ ความยาวรอยร้าวขณะนั้น

a_0 คือ ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น

$f(a/W)$ คือ ฟังก์ชันไร้หน่วย ซึ่งขึ้นกับชนิดชิ้นงาน และอัตราส่วนความยาวรอยร้าวต่อความกว้างชิ้นงาน

C คือ ค่าคงตัวที่ควบคุมอัตราการปรับลดค่า ΔK

และภาระเฉลี่ย P_m คำนวณได้จาก

$$P_m = \frac{\Delta P (1 + R)}{2 (1 - R)} \quad (2)$$

สมการที่ (1) สามารถใช้กับกรณีการทดสอบแบบ ΔK คงที่ ได้โดยการแทนค่า C เท่ากับศูนย์

3.2.5 โมดูล Waveform generator

หน้าที่ของโมดูลนี้ คือ แปลงสัญญาณภาระที่ผู้ทดสอบกำหนดหรือที่โปรแกรมคำนวณได้ไปเป็นสัญญาณอะนาล็อก แล้วส่งไปที่เครื่องทดสอบ ในบทความนี้จะเรียกสัญญาณนี้ว่า "สัญญาณควบคุม"

3.2.6 โมดูล Load compensation

หน้าที่ของโมดูลนี้ คือ ปรับลดส่วนต่างระหว่างภาระที่ต้องการกับภาระที่วัดได้จริง อัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับลด มีรายละเอียดดังนี้

1) คำนวณส่วนต่างภาระ โดยนิยามว่า

$$\text{ส่วนต่างภาระ} = \text{ภาระที่ต้องการ} - \text{ภาระที่วัดได้} \quad (3)$$

2) คำนวณค่าปรับแก้

ในที่นี้กำหนดให้การปรับแก้ในแต่ละครั้งของการทำซ้ำ เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของส่วนต่างภาระ เพื่อป้องกันการโอเวอร์ชูต (overshoot)

3) แปลงหน่วยของค่าปรับแก้ให้เป็นโวลต์ แล้วคำนวณสัญญาณควบคุมค่าใหม่จากสมการต่อไปนี้

$$\text{สัญญาณควบคุมใหม่} = \text{สัญญาณควบคุมเดิม} + \text{ค่าปรับแก้} \quad (4)$$

4) ทำขั้นตอนที่ 1-3 ซ้ำจนกว่าส่วนต่างภาระน้อยกว่า 2 เปอร์เซ็นต์

4. การสอบเทียบคลิปเกจ

เนื่องจากคลิปเกจที่ใช้เป็นคลิปเกจที่สร้างขึ้นเอง เมื่อนำมาใช้กับระบบทดสอบปัจจุบันจึงต้องสอบเทียบก่อน การสอบเทียบมี 2 อย่าง คือ 1) การสอบเทียบสถิตย์ (static calibration) และ 2) การสอบเทียบพลวัต (dynamic calibration)

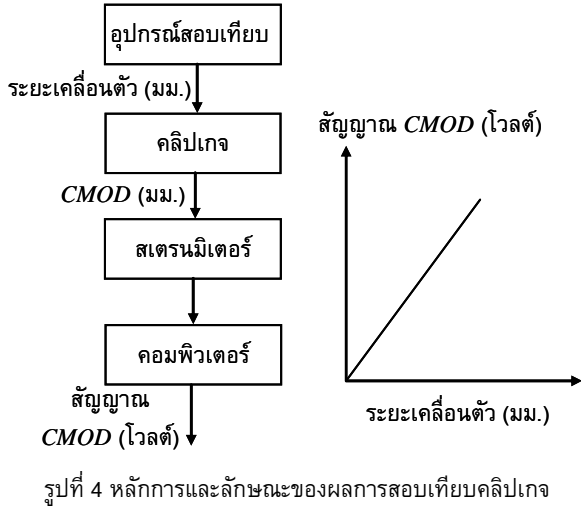
4.1 การสอบเทียบสถิตย์

หลักการที่ใช้ในการสอบเทียบสถิตย์ แสดงอยู่ในรูปที่ 4 จากรูปอุปกรณ์สอบเทียบ (calibrator) ทำหน้าที่กำหนดระยะเคลื่อนตัวที่ทราบค่าให้คลิปเกจ ระยะเคลื่อนตัวนี้จะเท่ากับระยะเคลื่อนตัวที่คลิปเกจวัดในการทดสอบ (หรือ *CMOD*) จากนั้นสัญญาณ *CMOD* จากคลิปเกจ จะถูกขยายด้วยสเตรนมิเตอร์ และแสดงผลด้วยโปรแกรมแล็บวิว อุปกรณ์สอบเทียบเป็นของบริษัท Shimadzu มีความจำแนกชัด เท่ากับ 1 ไมโครเมตร เมื่อนำสัญญาณ *CMOD* กับระยะเคลื่อนตัวของอุปกรณ์

สอบเทียบมาพล็อตกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.145 โวลต์/มม.

4.2 การสอบเทียบพลวัต

การสอบเทียบพลวัตในที่นี้คือ การหาฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปเกจในการวัดค่า *CMOD* วิธีทดสอบ คือ นำชิ้นงานที่มีรอยร้าวมารับภาระล้าความถี่ต่าง ๆ แล้วบันทึกผลการวัด *CMOD* และภาระ ชนิดของชิ้นงานที่ใช้ คือ compact tension (CT) กว้าง *W* เท่ากับ 50 มม. หน้า *B* เท่ากับ 25 มม. (รูปที่ 5) และทำจากอะลูมิเนียมผสม 7075 – T651 การทดสอบใช้ชิ้นงานที่มีความยาวรอยร้าวต่างกัน 4 ชั้น มีรอยร้าวยาว 10.5 มม., 14.7 มม., 20.1 มม. และ



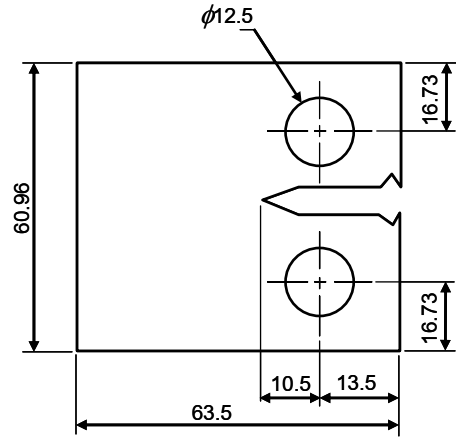
25.4 มม. ชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกทดสอบภายใต้ภาระล้าที่มีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.43 และ 0.8 และมีความถี่ภาระตั้งแต่ 1 เฮิรท์ ถึง 30 เฮิรท์ ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาคอมพลายแอนซ์ ซึ่งก็คืออัตราส่วนของพิสัย *CMOD* ต่อพิสัยภาระ ผลการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นว่า คอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานขึ้นกับความยาวรอยร้าวและความถี่ แต่ไม่ขึ้นกับอัตราส่วนภาระ สาเหตุที่คอมพลายแอนซ์ลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้นก็เนื่องมาจากคลิปเกจวัด *CMOD* ได้น้อยลงเมื่อความถี่ภาระสูงขึ้น ขณะที่แต่พิสัยภาระไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ อย่างไรก็ดี กราฟมีแนวโน้มคงที่สำหรับความถี่ภาระต่ำกว่า 1 เฮิรท์ ดังนั้นคอมพลายแอนซ์ที่ความถี่ 1 เฮิรท์ จึงถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการหาฟังก์ชันปรับแก้ *F* ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$F = \frac{C_{1Hz}}{C_{xHz}} \quad (5)$$

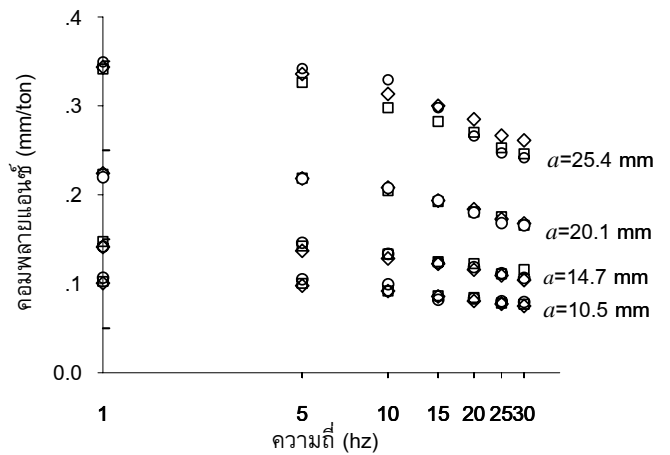
โดย C_{1Hz} คือ คอมพลายแอนซ์ที่ความถี่ 1 เฮิรท์

C_{xHz} คือ คอมพลายแอนซ์ที่ความถี่ใด ๆ ในช่วงที่มีการทดสอบ

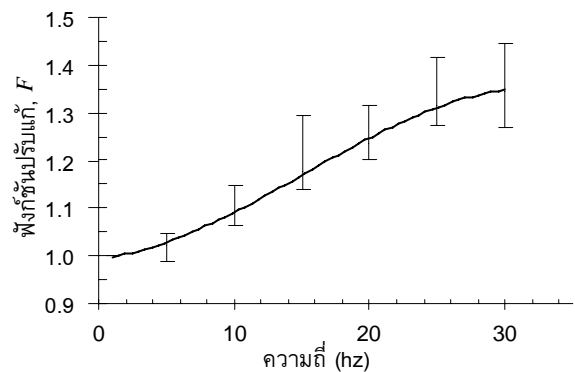
ผลการคำนวณฟังก์ชันปรับแก้ *F* (สมการที่ (5)) สำหรับแต่ละความยาวรอยร้าว สามารถพล็อตกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 7 สมการเส้นโค้งถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด คือ



รูปที่ 5 ชิ้นงานแบบ Compact tension (CT)



รูปที่ 6 คอมพลายแอนซ์ของชิ้นงานที่มีความยาวรอยร้าวต่างกัน ภายใต้ภาระล้าความถี่ต่าง ๆ



รูปที่ 7 ฟังก์ชันปรับแก้ผลตอบสนองเชิงความถี่ของคลิปเกจ *F*

$$F = -1.92 \times 10^{-5} f^3 + 8.67 \times 10^{-4} f^2 + 2.99 \times 10^{-3} f + 0.99 \quad (6)$$

โดย *f* คือ ความถี่ภาระ มีหน่วยเป็น เฮิรท์

ดังนั้นในการทดสอบที่ใช้ความถี่ภาระทดสอบมากกว่า 1 เฮิรท์ จะต้องปรับแก้ *CMOD* ที่วัดได้ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$CMOD' = CMOD \times F \quad (7)$$

โดย $CMOD'$ คือ $CMOD$ ที่ปรับแก้แล้ว

5. การประยุกต์ใช้โปรแกรมควบคุม

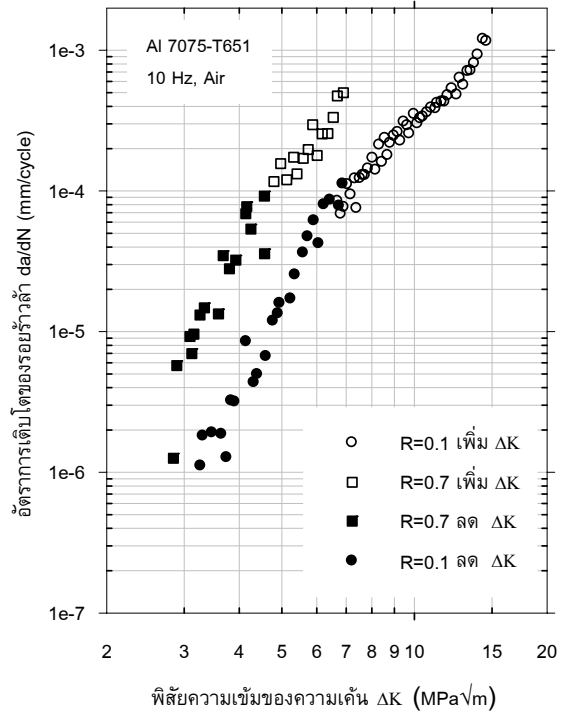
5.1 สภาวะทดสอบ

การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบแบบเพิ่ม ΔK แบบลด ΔK และแบบ ΔK คงที่ การทดสอบแบบเพิ่ม ΔK ทำที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 การทดสอบแบบลด ΔK ทำที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1, 0.3, 0.5 และ 0.7 โดยกำหนดค่าคงตัว C ซึ่งควบคุมอัตราการปรับลดพิสัยภาระ เท่ากับ -0.079 มม.^{-1} การทดสอบแบบ ΔK คงที่ ทำที่ ΔK เท่ากับ 4, 7 และ $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ และมีอัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 ทุกกรณี การทดสอบทั้ง 3 แบบ ใช้คลื่นรูปไซน์ ความถี่ 10 เฮิรท์ และทดสอบในสภาพแวดล้อมอากาศ

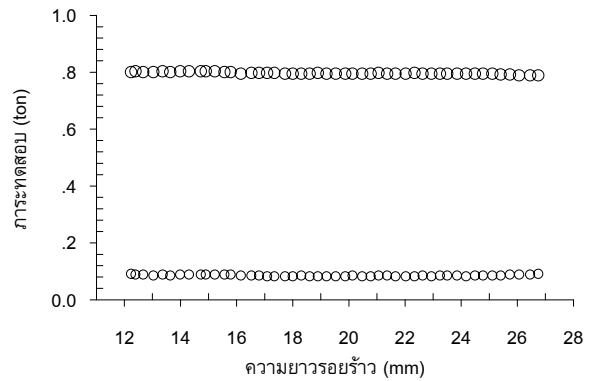
5.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

รูปที่ 8 แสดงอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 และ 0.7 ของการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK (สัญลักษณ์โปร่ง) และแบบลด ΔK (สัญลักษณ์ทึบ) จากรูปจะเห็นว่า ที่อัตราส่วนภาระเดียวกัน การทดสอบแบบเพิ่ม ΔK และลด ΔK ให้ผลลัพธ์ที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งหมายความว่า ΔK เป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวที่ควบคุม da/dN และการหาความสัมพันธ์ $da/dN-\Delta K$ นั้นจะหาจากการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK หรือแบบลด ΔK ก็ได้ รูปที่ 9 และ 10 แสดงขนาดของภาระสูงสุดและต่ำสุด ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ในการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK และแบบลด ΔK ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าโปรแกรมสามารถควบคุมขนาดภาระได้ตามที่ต้องการ รูปที่ 11 เปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าว ซึ่งได้จากการทดสอบที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Gluon ของบริษัท Shimadzu และที่ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเอง ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1 จากรูป ผลการทดสอบที่ใช้โปรแกรมทั้งสองสอดคล้องกัน ดังนั้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวแบบเพิ่ม ΔK และ แบบลด ΔK ได้อย่างแม่นยำ

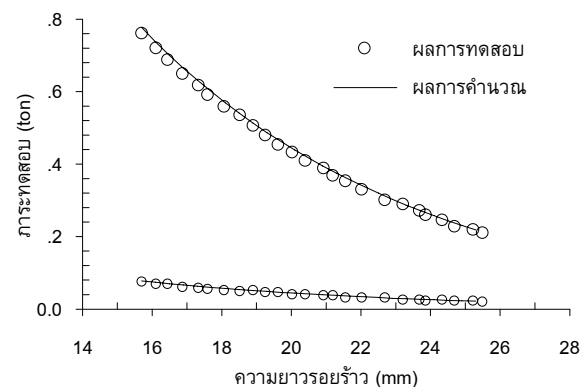
สำหรับการทดสอบแบบ ΔK คงที่ da/dN หาได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างความยาวรอยร้าวกับจำนวนรอบภาระ ดังตัวอย่างในรูปที่ 12 สำหรับการทดสอบที่ ΔK เท่ากับ 4, 7 และ $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ และอัตราส่วนภาระ เท่ากับ 0.1 นั้น da/dN มีค่าเท่ากับ 5.78×10^{-6} , 1.85×10^{-4} และ 4.18×10^{-4} มม./รอบ ตามลำดับ ถ้าเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในรูปที่ 11 จะพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวแบบ ΔK คงที่ ได้อย่างแม่นยำ



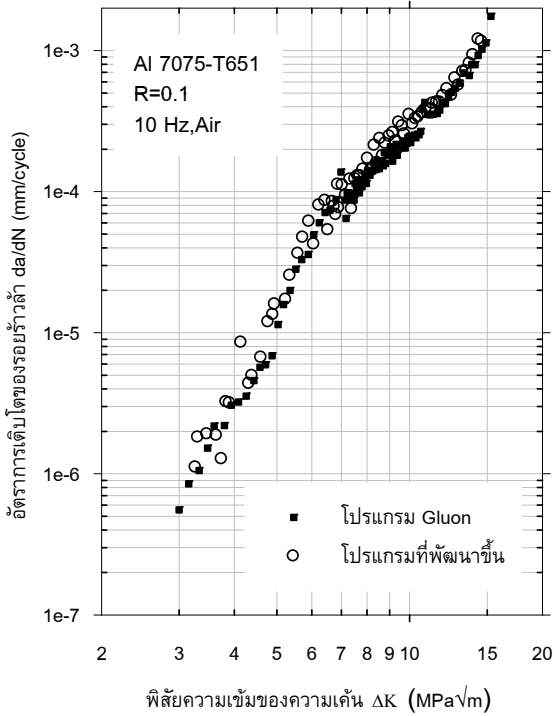
รูปที่ 8 อัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้จากการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK และแบบลด ΔK ที่อัตราส่วนภาระ 0.1 และ 0.7



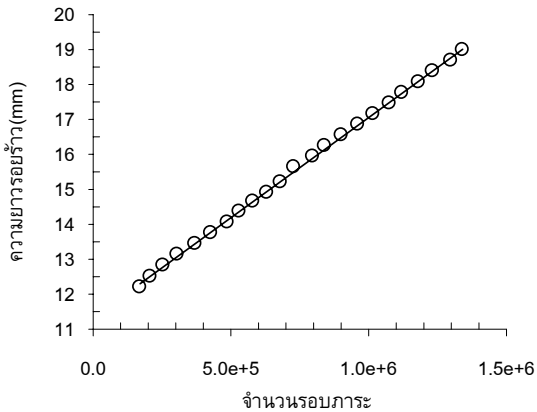
รูปที่ 9 ภาระสูงสุด-ต่ำสุดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ในการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK (อัตราส่วนภาระ เท่ากับ 0.1)



รูปที่ 10 ภาระสูงสุด-ต่ำสุดที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ ในการทดสอบแบบลด ΔK (อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.1)

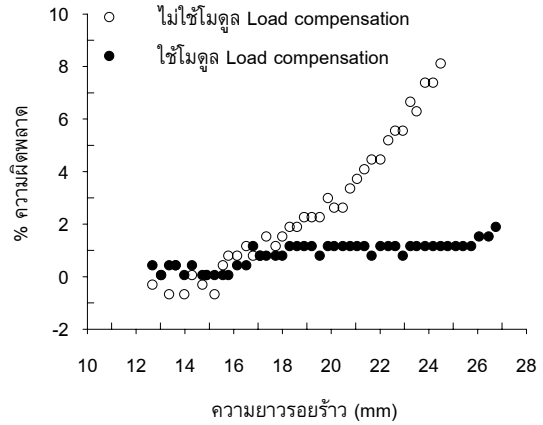


รูปที่ 11 อัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ได้เมื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น กับเมื่อใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ที่อัตราส่วนภาระ 0.1



รูปที่ 12 ความยาวรอยร้าวที่รอบภาระต่าง ๆ ในการทดสอบแบบควบคุม ΔK ที่ ΔK เท่ากับ $4 \text{ MPa}\sqrt{m}$

เนื่องจากความถูกต้องของผลการทดสอบขึ้นกับความสามารถของโปรแกรมในการควบคุมภาระให้เท่ากับค่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบการทำงานของโมดูล Load compensation ในการปรับแก้ภาระ จึงทำการทดสอบแบบเพิ่ม ΔK (พิสัยภาระคงที่) ที่ อัตราส่วนภาระ เท่ากับ 0.1 และภาระสูงสุดเท่ากับ 800 กก. เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระสูงสุด (จากค่าที่ต้องการ) ในการทดสอบที่ใช้โมดูลนี้ และในการทดสอบที่ไม่ใช้โมดูลนี้ แสดงอยู่ในรูปที่ 13 จากรูปจะเห็นว่า โมดูล Load compensation ช่วยลดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจาก 8 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ 13 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของภาระสูงสุด ที่ความยาวรอยร้าวต่าง ๆ เมื่อใช้และไม่ใช้โมดูล load compensation

6. สรุป

บทความกล่าวถึง โครงสร้างและการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล่า ต่อมากล่าวถึงการประยุกต์โปรแกรมกับการทดสอบแบบต่าง ๆ คือ การทดสอบแบบเพิ่ม ΔK แบบลด ΔK และแบบ ΔK คงที่ และเปรียบเทียบผลการทดสอบบางส่วนกับการทดสอบที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของผู้ผลิตเครื่องทดสอบ ผลการทดสอบแสดงว่าโปรแกรมสามารถควบคุมภาระได้แม่นยำตามที่ต้องการในการทดสอบทุกแบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASTM E647-05., 2005. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [2] Skorupa, M., 1998. *Load Interaction Effects During Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading—A Literature Review, Part 1 : Empirical Trends*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 21, pp. 987-1006.
- [3] Kaisand, L.R., and LeFort, P., 1976. Digital Computer Controlled Threshold Stress Intensity Factor Fatigue Testing. *Use of Computers in the Fatigue Laboratory*, ASTM STP 613, Harold Mindlin and R.W. Landgraf, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 142-159.
- [4] Saxena, A., Hudak, S.J., Donald, J.K., and Schmidt, D.W., 1978. *Computer-Controlled Decreasing Stress Intensity Technique for Low Rate Fatigue Crack Growth Testing*. J. of Testing and Evaluation, Vol.6, No. 3, pp.167-174.
- [5] Cheng, Y.W., and Read, D.T., 1985. An Automated Fatigue Crack Growth Rate Test System. *Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth*, ASTM STP 877, W.H.Cullen, R.W.Landgraf, L.R.Kaisand, and J.H.Underwood, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 213-223.

- [6] Yandt, S.A., 2000. *Development of a Thermal-Mechanical Fatigue Testing Facility*. Master Thesis, Carleton University.
- [7] McGowan, J.J., and Keating, J.L., 1985. A Microprocessor-Based System for Determining Near-Threshold Fatigue Crack Growth Rates. *Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth, ASTM STP 877*, W.H.Cullen, R.W.Landgraf, L.R.Kaisand, and J.H.Underwood, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 167-176.
- [8] Instron Corporation, FastTrack™ Software.
<http://www.instron.co.uk/wa/products/software/fasttrack/dadn.aspx> (accessed on June 2007).
- [9] MTS Systems Corporation, Material Testing Software, Fatigue Crack Growth.
http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_002072.pdf (accessed on June 2007).
- [10] ยอดยิ่ง หมวกงาม และจิรพงศ์ กสิวิทย์อำนาจ, พศ. 2546. การออกแบบคลิปเกจ และการประยุกต์ใช้กับการทดสอบการแตกหัก. *การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, ปราณบุรี, 15-17 ตุลาคม.*