

วิธีประมาณสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

Estimation Method of the Fatigue Crack Growth Rate Equation

จिरพงศ์ กสิวิทย์อำนวย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท กรุงเทพฯ 10330

โทร. 2186636, อีเมล : Jirapong.K@eng.chula.ac.th

Jirapong Kasivitamnuy

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University Payathai Rd, Bangkok 10330

Tel. 2186636, E-mail : Jirapong.K@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนำเสนอวิธีประมาณสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวสำหรับกรณีที่ไม่สามารถวัดความยาวรอยร้าวอย่างต่อเนื่องระหว่างการทดสอบได้ พารามิเตอร์ของสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวในช่วงที่สองหาจากการแก้สมการความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการที่ใช้เพื่อให้รอยร้าวเติบโตจากความยาวเริ่มต้น ถึงความยาวสิ้นสุดค่าหนึ่ง กับพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor range) จำนวนสองสมการ จากชิ้นงานทดสอบชิ้นเดียวกัน การประยุกต์วิธีประมาณนี้กับข้อมูลการเติบโตของรอยร้าวของวัสดุ AISI 4140 ที่อัตราส่วนการตั้งแต่น้อย 0.13 ถึง 0.78 ณ อุณหภูมิห้อง พบว่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของพารามิเตอร์ อยู่ในช่วง -20% ถึง 20% เทียบกับผลการทดสอบแบบปกติ ดังนั้นวิธีการที่เสนอสามารถประมาณสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวได้อย่างแม่นยำ

Abstract

The research presents the estimation method of fatigue crack growth rate equation for the case that crack length can not be measured continuously. The crack growth parameters are determined by solving one pair of the equation that relates the number of cycles requires for crack to grow from an initial to a final length and the stress intensity factor range. The equations use the data obtained from the same specimen. Application of this technique to room temperature crack growth data of AISI 4140 steel with load ratios range from 0.13-0.78 shows that percent error of the parameters lies within the range of -20% to 20% as compare to those from the normal test. Therefore, this technique can accurately approximate the fatigue crack growth rate equation.

1. บทนำ

การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวต้องการข้อมูลความยาวรอยร้าวที่จำนวนรอบการต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทดสอบ โดย

การวัดความยาวรอยร้าวสามารถทำได้สองวิธี คือ 1) การวัดโดยตรง (Direct measurement) และ 2) การวัดโดยอ้อม (Indirect measurement)

การวัดโดยตรง ทำโดยใช้กล้องขยาย (Microscope) ส่องดูจุดเริ่มต้นของรอยร้าว เลื่อนไปจนถึงจุดปลายรอยร้าว ดังนั้นความยาวรอยร้าวจะเท่ากับระยะทางที่กล้องขยายเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการทดสอบกระทำในห้องปิด (Closed chamber) เช่น การทดสอบที่อุณหภูมิสูง หรือการทดสอบที่สภาวะกัดกร่อน เราไม่สามารถใช้วิธีวัดโดยตรงได้ ในกรณีเช่นนี้จำเป็นต้องใช้วิธีการวัดโดยอ้อม

การวัดโดยอ้อม หมายถึง การใช้ปริมาณทางกายภาพอื่นตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของรอยร้าว ตัวอย่างของปริมาณทางกายภาพที่นิยม ได้แก่ ความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของชิ้นงาน, ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม (Potential drop) ระหว่างจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน เป็นต้น ในการวัดโดยอ้อมเราจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกายภาพที่เลือกกับความยาวของรอยร้าวก่อนล่วงหน้า ความสัมพันธ์นี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ชนิด, ขนาด, วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานทดสอบ และสภาพแวดล้อมที่ทำการทดสอบ การวัดโดยอ้อมต้องอาศัยเครื่องมือวัด เช่น เกจวัดระยะเปิดของรอยร้าว (Crack opening displacement gauge, COD gauge) หากต้องการวัดความแข็งเกร็งของชิ้นงาน หรือ ในกรณีที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม อุปกรณ์ที่จำเป็น ได้แก่ แหล่งจ่ายกระแสที่ ขูดขยายสัญญาณแรงดัน วงจรปรับแต่งสัญญาณ เป็นต้น แต่เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาแพง ทำให้ห้องปฏิบัติการอาจไม่สามารถจัดหาเครื่องมือเหล่านี้มาใช้ได้

จากที่กล่าวมา สรุปได้ว่า การติดตามรอยร้าวโดยตรง หรือโดยอ้อมต่างก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ในกรณีที่ขาดแคลนเครื่องมือวัดราคาแพงเหล่านั้น การพัฒนาวิธีการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลที่นำไปสู่การหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวโดยประมาณที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ เป็นสิ่งที่มีประโยชน์มาก

Lovegrove et al.^[1] เสนอวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ในสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว ในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติบโตของรอยร้าว และค่าพิสัยความเข้มของความเค้น (Stress intensity factor range, ΔK) เป็นแบบเชิงเส้นบนสเกล ล็อก-ล็อก วิธีของ Lovegrove คำนวณหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบชิ้น

งานที่มีความยาวรอยร้าวเริ่มต้นต่างกันอย่างน้อย 2 ชิ้นภายใต้ภาระล้า ซึ่งมีอัตราส่วนภาระเท่ากัน จนกระทั่งเสียหาย Lovegrove ทวนสอบผลการประมาณกับข้อมูลอัตราการใช้ของรอยร้าวของนักวิจัยท่านอื่น พบว่าวิธีของเขามีความแม่นยำสูง

งานวิจัยนี้ดัดแปลงวิธีของ Lovegrove เพื่อให้ใช้ชิ้นงานทดสอบเพียงชิ้นเดียว โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อทฤษฎี และทำการทวนสอบโดยใช้ข้อมูลการทดสอบวัสดุ AISI 4140 ที่อุณหภูมิห้อง

2. ทฤษฎี

2.1 รายละเอียด

อัตราการเติบโตของรอยร้าวล้าในช่วงเติบโตอย่างเสถียรมีความสัมพันธ์กับค่าพิสัยความเข้มของความเค้นตามสมการ

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

โดย da/dN คืออัตราการเติบโตของรอยร้าว

ΔK คือพิสัยความเข้มของความเค้น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวรอยร้าว, พิสัยของภาระ, รูปร่าง และขนาดของชิ้นงาน

C และ m ค่าพารามิเตอร์ในสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวที่ต้องการประมาณค่า

สำหรับกรณีใด ๆ จำนวนรอบที่ต้องการเพื่อให้รอยร้าวเติบโตจากความยาวเริ่มต้น a_i ถึงความยาวสุดท้าย a_f จะเท่ากับค่าอินทิกรัลส่วนกลับของอัตราการเติบโตของรอยร้าวจากความยาวเริ่มต้น ถึงสิ้นสุด ซึ่งจะเขียนได้ในรูปของ

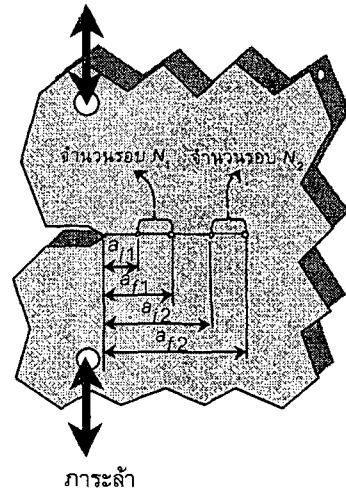
$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{da/dN} da$$

สำหรับกรณีที่พิจารณา จากสมการที่ (1) จะได้

$$N = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{\Delta K^m} da \quad (2)$$

ดังนั้น ถ้าทราบจำนวนรอบที่รอยร้าวต้องการเพื่อเติบโตจากความยาว a_{i1} ถึง a_{f1} และจากความยาว a_{i2} ถึง a_{f2} คือ N_1 และ N_2 ตามลำดับแล้ว (ดูรูปที่ 1 ประกอบ) จากสมการที่ (2) จะได้

$$N_1 = \frac{1}{C} \int_{a_{i1}}^{a_{f1}} \frac{1}{\Delta K^m} da \quad (3.1)$$



รูปที่ 1 วิธีการทดสอบเพื่อประมาณพารามิเตอร์ในสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า

และ

$$N_2 = \frac{1}{C} \int_{a_{i2}}^{a_{f2}} \frac{1}{\Delta K^m} da \quad (3.2)$$

หารสมการที่ (3.1) ด้วยสมการที่ (3.2) จะได้

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\int_{a_{i1}}^{a_{f1}} \frac{1}{\Delta K^m} da}{\int_{a_{i2}}^{a_{f2}} \frac{1}{\Delta K^m} da} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เราสามารถหาค่า m ได้โดยวิธีเชิงตัวเลข และสามารถหาค่า C ได้โดยแทนค่า m ลงในสมการที่ (3.1) หรือ (3.2)

2.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนอย่างง่าย

หากพิจารณาสมการที่ (4) จะพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อความแม่นยำของพารามิเตอร์ m คือ ความยาวรอยร้าว a_{i1} , a_{f1} , a_{i2} และ a_{f2} และ จำนวนรอบที่รอยร้าวใช้ในการเติบโต N_1 และ N_2 เนื่องจากการทดลองทำการวัดความยาวรอยร้าวโดยตรงด้วยกล้องขยายจึงอาจถือว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อย ไม่ต้องนำมาพิจารณา

สำหรับกรณีทั่ว ๆ ไป ΔK ของชิ้นงานทดสอบ จะเขียนได้ในรูป

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (5)$$

โดย ΔP คือ พิสัยของแรงกระทำ

a คือ ขนาดของรอยร้าว

W คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ

B คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ

$f(a/W)$ คือ ตัวประกอบปรับแก้ขนาดจำกัด (Finite size correction factor)

แทนสมการที่ (5) ลงในสมการที่ (4) จะได้

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\int_{a_{i1}}^{a_{f1}} \frac{1}{f\left(\frac{a}{W}\right)^m} da}{\int_{a_{i2}}^{a_{f2}} \frac{1}{f\left(\frac{a}{W}\right)^m} da} \quad (6)$$

ในกรณีที่ $a_{f1} - a_{i1}$ และ $a_{f2} - a_{i2}$ มีค่าน้อย เราสามารถประมาณฟังก์ชัน $f(a/W)$ ด้วยค่าคงที่ $f(a_{avg1}/W)$ และ $f(a_{avg2}/W)$ โดย $a_{avg1} = \frac{1}{2}(a_{f1} + a_{i1})$ และ $a_{avg2} = \frac{1}{2}(a_{f2} + a_{i2})$ ได้ ดังนั้นค่าอินทิกรัลด้านขวาของสมการที่ (6) จะมีค่าประมาณคือ

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \frac{a_{f1} - a_{i1}}{a_{f2} - a_{i2}} \left[\frac{f\left(\frac{a_{avg2}}{W}\right)}{f\left(\frac{a_{avg1}}{W}\right)} \right]^m \quad (7)$$

ก่อนจะพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนของอายุความล้า N_1 และ N_2 ต่อพารามิเตอร์ m เราจำเป็นต้องทราบว่าสมการที่ (7) ถูกสร้างขึ้นในเชิง Deterministic การเพิ่มตัวแปรเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อน ลงในขั้นตอนนี้อาจทำให้สมการที่ (4) ไม่เป็นจริง แต่เนื่องจากเราต้องการทราบเพียงแนวโน้ม และขอบเขตความผิดพลาดโดยประมาณ เราจึงสมมุติให้สมการที่ (4) และ (7) ยังคงเป็นจริงในกรณีที่รวมผลความคลาดเคลื่อนของอายุความล้าแล้ว

ถ้ากำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของ N_1 และ N_2 คือ $\pm \Delta N_1$ และ $\pm \Delta N_2$ ตามลำดับ แล้วความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ m คือ

$$\Delta m = \frac{\log\left(1 \pm \frac{\Delta N_1}{N_1} \pm \frac{\Delta N_2}{N_2}\right)}{\log\left(\frac{f\left(\frac{a_{avg2}}{W}\right)}{f\left(\frac{a_{avg1}}{W}\right)}\right)} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) เราสามารถสรุปได้ว่า ยิ่งความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทั้งสองชุดน้อยเพียงใด การประมาณก็จะยิ่งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำเท่านั้น นอกจากการเลือกใช้ข้อมูลคู่ที่มีความยาวรอยร้าวเฉลี่ยแตกต่างกันพอสมควรจะช่วยลดผลของความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้น้อยลง

การประมาณค่า C เมื่อ m มีค่าเท่ากับ ค่าขอบเขตบน $m + \Delta m$ และ ขอบเขตล่าง $m - \Delta m$ ทำโดยแทนค่าขอบเขตลงในสมการที่ (3.1) หรือ (3.2) โดยไม่พิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอายุความล้า ดังนั้นสำหรับกรณีสมการ (3.1) จะได้

$$C_{LB} = \frac{1}{N_1} \int_{a_{i1}}^{a_{f1}} \frac{1}{(\Delta K)^{m+\Delta m}} da \quad (\text{ขอบเขตล่าง})$$

(9.1)

$$C_{UB} = \frac{1}{N_1} \int_{a_{i1}}^{a_{f1}} \frac{1}{(\Delta K)^{m-\Delta m}} da \quad (\text{ขอบเขตบน}) \quad (9.2)$$

ดังนั้นขอบเขตของสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวก็คือ

$$\frac{da}{dN} = C_{UB} \Delta K^{m-\Delta m} \quad (\text{ขอบเขตล่าง}) \quad (10.1)$$

$$\frac{da}{dN} = C_{LB} \Delta K^{m+\Delta m} \quad (\text{ขอบเขตบน}) \quad (10.2)$$

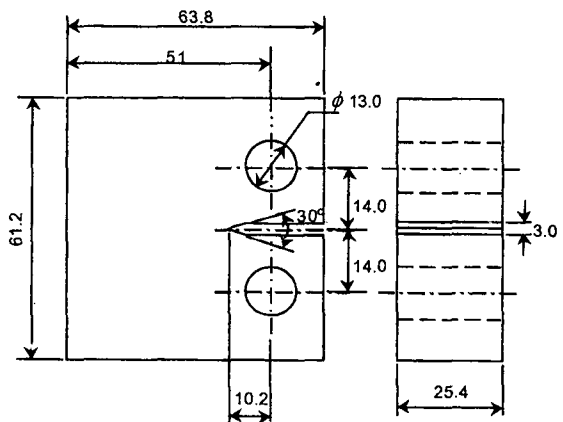
3. การทดสอบ

3.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบหาอัตราการเติบโตของรอยร้าวล้า ยึดตามมาตรฐาน ASTM E647-95a^[3] ชิ้นงานทดสอบที่ใช้เป็นแบบ Compact Tension (CT) รูปร่าง และขนาดของชิ้นงาน แสดงอยู่ในรูปที่ 2 วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน คือ AISI 4140 และการทดสอบกระทำที่อุณหภูมิห้อง วิธีการทดสอบโดยย่อ คือ 1) สร้างรอยร้าวจากรอยบากจนมีความยาวตามที่กำหนดในมาตรฐาน และ 2) กระทำภาระล้ากับชิ้นงาน โดยต้องกำหนด ภาระเฉลี่ย, แอมพลิจูดภาระ, ความถี่ และรูปคลื่น ในระหว่างนี้ จะมีการเก็บข้อมูลความยาวรอยร้าว และจำนวนรอบภาระ เป็นระยะ ๆ จนถึงสิ้นสุดการทดสอบ อัตราการเติบโตของรอยร้าวคือ ความชันของเส้นโค้งที่พล็อตระหว่างความยาวรอยร้าวกับจำนวนรอบ

3.2 สภาวะทดสอบ

การทดสอบเป็นแบบควบคุมภาระ (Load control) รูปคลื่นภาระที่ใช้เป็นรูปไซน์ ความถี่ 20 หรือ 30 เฮิรตซ์ ที่อัตราส่วนภาระ (ภาระต่ำสุดหารด้วยภาระสูงสุด) ตั้งแต่ 0.13 ถึง 0.78 รวมทั้งสิ้น 12 กรณี



ขนาดเป็นมิลลิเมตร

รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบแบบ Compact Tension (CT)

4. ผลการประมาณ และการอภิปรายผล

ตารางที่ 1 แสดงผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ m และ C ที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ ผลการประมาณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของ เส้นกราฟอัตราการเติบโตของรอยร้าวจากการประมาณร่วมกับผลจากการทดลอง ที่อัตราส่วนภาระ เท่ากับ 0.46

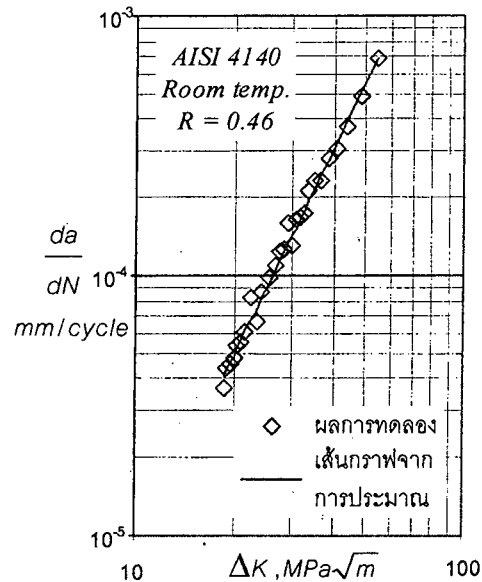
เนื่องจากการควบคุมให้รอยร้าวมีความยาวตามที่ต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากเสียเวลา จึงจำเป็นต้องศึกษาผลของความยาวรอยร้าวเริ่มต้น และสิ้นสุด ต่อค่าประมาณของพารามิเตอร์ m และ C ในที่นี้เลือกมาพิจารณาเพียงกรณีเดียวคือ ที่อัตราส่วนภาระ เท่ากับ 0.13 ผลการประมาณแสดงอยู่ในตารางที่ 3 จากตารางจะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์ m ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับความยาวรอยร้าวเริ่มต้น และสิ้นสุด เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอายุความล้าของแต่ละช่วงมีความไม่แน่นอน ดังนั้นจึงสามารถเลือกเก็บข้อมูลได้อย่างอิสระ

ถ้าต้องการทราบผลของความคลาดเคลื่อนของอายุความล้า ให้ทำการคำนวณค่า Δm จากสมการที่ (8) ดังนั้นค่าขอบเขตบน และล่างของพารามิเตอร์ m ที่ได้จากวิธีประมาณ คือ $m + \Delta m$ และ $m - \Delta m$ ตามลำดับ ในการคำนวณหา Δm เราจำเป็นต้องกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนรวมของอายุความล้า $\frac{\Delta N_1}{N_1} + \frac{\Delta N_2}{N_2}$ ที่ทำ

ให้ค่า m จากการทดลองอยู่ภายในขอบเขตของการประมาณ ซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่ทราบว่ามีค่าเท่าใด

จากผลการประมาณในตารางที่ 2 หากทำการคำนวณย้อนกลับด้วยการแทนค่าความคลาดเคลื่อน Δm ลงไปในสมการที่ (8) เราจะได้ความคลาดเคลื่อนรวมของอายุความล้า จากตาราง ค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนรวมของอายุความล้า คือ ± 21.33 เปอร์เซ็นต์ (ข้อมูลลำดับที่ 11) ดังนั้นถ้าเลือกใช้ค่าคลาดเคลื่อนรวมของอายุความล้า เท่ากับ ± 22 เปอร์เซ็นต์กับข้อมูลทุกกรณี เราจะสามารถหาขอบเขตบน และล่างที่ครอบคลุมค่า m จากการทดลองได้

ตารางที่ 3 แสดงผลการทำนายอายุความล้าโดยใช้สมการอัตราการเติบโตของรอยร้าวจากวิธีประมาณ สมการขอบเขตบนของอัตราการเติบโตของรอยร้าว และสมการขอบเขตล่างของอัตราการเติบโตของรอยร้าว ตามลำดับ จะเห็นว่าความผิดพลาดของผลการทำนายมีค่าน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสูง



รูปที่ 3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบอัตราการเติบโตของรอยร้าวจากวิธีประมาณ และจากการทดลอง ที่อัตราส่วนภาระเท่ากับ 0.46

ตารางที่ 1 ผลการประมาณค่าของพารามิเตอร์ m และ C ที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ

อัตราส่วนภาระ	ความยาวรอยร้าวเริ่มต้น / สิ้นสุด (มม)		อายุความล้า (รอบ)		พารามิเตอร์ m		พารามิเตอร์ C	
	ช่วงที่หนึ่ง	ช่วงที่สอง	ช่วงที่หนึ่ง	ช่วงที่สอง	ประมาณ	ทดลอง	ประมาณ	ทดลอง
0.13	5.63/8.29	18.97/22.98	239,999	35,003	2.808	2.764	1.084×10^{-8}	1.211×10^{-8}
0.23	4.74/7.91	18.84/21.57	49,997	4,501	2.797	2.975	8.872×10^{-9}	9.435×10^{-9}
0.38	9.09/15.17	20.82/27.59	117,0020	65,005	3.662	3.710	8.318×10^{-10}	7.425×10^{-10}
0.41	5.91/9.95	21.90/27.70	393,357	20,997	2.983	2.981	7.969×10^{-9}	8.016×10^{-9}
0.43	3.63/8.54	19.33/26.93	409,995	24,997	3.147	3.142	3.424×10^{-9}	3.567×10^{-9}
0.45	4.37/10.14	19.02/23.08	150,173	12,000	2.619	2.678	2.072×10^{-8}	1.759×10^{-8}
0.46	4.25/10.11	15.23/22.85	101,998	22,788	2.637	2.628	1.840×10^{-8}	1.917×10^{-8}
0.63	8.17/12.00	23.28/28.20	4,000,007	117,500	3.463	3.540	2.040×10^{-9}	1.777×10^{-9}
0.65	3.25/8.66	21.56/27.58	2,010,009	65,002	2.990	2.965	7.943×10^{-9}	8.228×10^{-9}
0.67	7.22/11.95	19.80/24.68	650,003	40,229	3.527	3.486	1.149×10^{-9}	1.422×10^{-9}
0.75	18.04/20.23	28.07/30.94	1,530,025	61,000	3.424	3.516	2.036×10^{-9}	1.870×10^{-9}
0.78	3.00/7.28	21.11/26.23	4,040,004	100,003	3.390	3.410	1.191×10^{-9}	1.885×10^{-9}

ตารางที่ 2 ผลของความยาวรอยร้าวเริ่มต้น และสิ้นสุดต่อค่าประมาณ ของพารามิเตอร์ m และ C ที่อัตราส่วนการเท่ากับ 0.13

ลำดับ	ความยาวรอยร้าว เริ่มต้น/สิ้นสุด (มม)		อายุความล้า (รอบ)		ค่าพารามิเตอร์จาก วิธีประมาณ		ความคลาดเคลื่อน ของ $m^{(1)}$		ความคลาดเคลื่อน รวมของอายุ ความล้า
	ช่วงที่หนึ่ง	ช่วงที่สอง	ช่วงที่หนึ่ง	ช่วงที่สอง	m	C	ค่า	ร้อยละ	
1	5.63/6.17	22.15/22.98	60,000	4,502	2.950	7.206×10^{-9}	-0.186	-6.73	± 17.34
2	5.63/6.17	18.97/22.98	60,000	35,003	2.881	8.517×10^{-9}	-0.117	-4.20	± 9.91
3	5.63/6.17	14.31/22.98	60,000	143,992	2.764	1.131×10^{-8}	0.000	0.00	± 0.00
4	5.63/6.17	10.13/22.98	60,000	313,668	2.912	7.894×10^{-9}	-0.148	-5.36	± 8.21
5	5.63/8.29	18.97/22.98	239,999	35,003	2.808	1.084×10^{-8}	-0.044	-1.59	± 3.62
6	5.63/8.29	14.31/22.98	239,999	143,992	2.653	1.586×10^{-8}	0.111	4.02	± 7.66
7	5.63/8.29	10.13/22.98	239,999	313,668	2.767	1.198×10^{-8}	-0.003	-0.11	± 0.16
8	5.63/12.51	18.97/22.98	459,996	35,003	2.765	1.248×10^{-8}	-0.001	-0.04	± 0.07
9	5.63/12.51	14.31/22.98	459,996	143,992	2.567	2.065×10^{-8}	0.197	7.13	± 11.63
10	6.69/8.29	18.97/22.98	120,001	35,003	2.674	1.684×10^{-8}	0.090	3.26	± 7.58
11	6.69/8.29	14.31/22.98	120,001	143,992	2.461	2.863×10^{-8}	0.303	10.96	± 21.33
12	6.69/8.29	10.13/22.98	120,001	313,668	2.488	2.675×10^{-8}	0.276	9.99	± 14.76
13	6.69/12.51	18.97/22.98	339,998	35,003	2.694	1.574×10^{-8}	0.070	2.53	± 5.06
14	6.69/12.51	14.31/22.98	339,998	143,992	2.451	2.950×10^{-8}	0.313	11.32	± 18.09
15	8.29/12.51	18.97/22.98	219,997	35,003	2.708	1.504×10^{-8}	0.056	2.03	± 3.79
16	8.29/12.51	14.31/22.98	219,997	143,992	2.444	3.014×10^{-8}	0.320	11.58	± 16.97
17	9.20/12.51	18.97/22.98	158,799	35,003	2.686	1.617×10^{-8}	0.078	2.82	± 5.12
18	9.20/12.51	14.31/22.98	158,799	143,992	2.393	3.526×10^{-8}	0.371	13.42	± 18.88
19	5.63/6.17	14.31/18.97	60,000	108,989	2.702	1.314×10^{-8}	0.062	2.24	± 3.69
20	5.63/6.17	10.13/18.97	60,000	278,665	2.921	7.734×10^{-9}	-0.157	-5.68	± 6.91
21	5.63/8.29	14.31/18.97	239,999	108,989	2.568	1.959×10^{-8}	0.196	7.09	± 10.96
22	5.63/8.29	10.13/18.97	239,999	278,665	2.755	1.233×10^{-8}	0.009	0.33	± 0.36
23	5.63/12.51	14.31/18.97	459,996	108,989	2.448	2.801×10^{-8}	0.316	11.43	± 14.34

(1) ค่า m จากการทดลองคือ 2.764

ตารางที่ 3 ผลการทำนายอายุความล้าโดยสมการอัตราการใช้ของรอยร้าวจากวิธีประมาณ

อัตรา ส่วน ภาระ	ความยาวรอยร้าว เริ่มต้น/สิ้นสุด (มม)	อายุความล้า จากการทดลอง (รอบ)	อายุความล้าจากการทำนาย (รอบ)			เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)		
			ใช้สมการ ประมาณ ⁽¹⁾	ใช้สมการ ขอบเขตล่าง ⁽²⁾	ใช้สมการ ขอบเขตบน ⁽²⁾	สมการ ประมาณ	สมการ ขอบเขตล่าง	สมการ ขอบเขตบน
0.13	5.63/22.98	664,999	668,300	719,679	703,822	0.50	8.22	5.84
0.23	4.74/21.57	114,500	122,918	136,932	129,599	7.35	19.59	13.19
0.38	9.09/27.59	1,455,003	1,538,341	1,592,591	1,655,759	5.73	9.46	13.80
0.41	5.91/27.70	767,367	775,892	792,308	829,637	1.11	3.25	8.12
0.43	3.63/26.93	694,991	707,446	729,812	757,278	1.79	5.01	8.96
0.45	4.37/23.08	244,676	248,479	269,688	263,792	1.55	10.22	7.81
0.46	4.25/22.85	164,787	166,359	190,380	175,851	0.95	15.53	6.71
0.63	8.17/28.20	7,357,505	7,249,075	6,788,867	7,782,430	-1.47	-7.73	5.78
0.65	3.25/27.58	3,370,006	3,371,985	3,332,475	3,601,011	0.06	-1.11	6.86
0.67	7.22/24.68	930,227	930,270	1,088,003	1,097,575	0.01	16.96	17.99
0.75	18.04/30.94	2,851,003	3,196,515	3,217,093	3,414,542	-12.12	12.84	19.77
0.78	3.00/26.23	7,389,999	7,374,748	7,316,242	7,908,093	-0.21	-1.00	7.01

(1) ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1

(2) กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนรวมของอายุความล้าคือ ± 20 เปอร์เซ็นต์

5. การประยุกต์วิธีประมาณ

วิธีประมาณสามารถประยุกต์ได้เฉพาะกับข้อมูลการเติบโตของรอยร้าวในช่วงที่ 2 ซึ่งมีอัตราการเติบโตของรอยร้าวตั้งแต่ 10^{-6} ถึง 10^{-3} มม./รอบ [3] จากประสบการณ์การทดสอบวัสดุชนิดนี้ที่อุณหภูมิห้อง ความยาวรอยร้าวที่สั้นที่สุดที่ทำให้อัตราการเติบโตของรอยร้าวมากกว่า 10^{-6} มม./รอบ คือ ความยาวรอยร้าวที่ทำให้ ΔK มีค่าเท่ากับ $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ส่วนความยาวรอยร้าวที่ยาวที่สุดจะถูกกำหนดโดยค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นวิกฤติ K_{IC} ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุ การทราบความยาวรอยร้าวทั้งสองข้างต้นจะช่วยในการวางแผนการทดลอง

แม้ว่างานวิจัยนี้จะประยุกต์วิธีประมาณกับวัตถุที่มีรอยร้าวเพียงรูปร่างเดียว (คือ ชิ้นงานทดสอบแบบ CT) และที่สภาวะแวดล้อมแบบเดียว (คือ อากาศ ที่อุณหภูมิห้อง) แต่ถ้ามพิจารณาสมการที่ (1) จะพบว่า 1) วิธีประมาณสามารถใช้ได้กับโครงสร้างรูปทรงใด ๆ ที่ทราบผลเฉลยตัวประกอบความเข้มของความเค้น และ 2) สามารถประยุกต์กับการทดสอบที่อุณหภูมิสูง หรือที่ สภาพแวดล้อมกัดกร่อนได้ แต่จะมีข้อจำกัดว่ากลไกความเสียหาย (Damage mechanisms) ของข้อมูลทั้งสองชุดจะต้องเหมือนกัน อย่างไรก็ตามได้มีการยืนยันความเป็นไปได้ข้างต้นด้วยข้อมูลจากการทดลอง

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนำเสนอวิธีประมาณสมการอัตราการเติบโตของรอยร้าว ความแม่นยำของการประมาณขึ้นกับความคลาดเคลื่อนของจำนวนรอบที่รอยร้าวใช้เติบโตจากความยาวเริ่มต้น ถึงความยาวสิ้นสุดที่กำหนด โดยไม่ขึ้นกับความยาวรอยร้าวเริ่มต้น และสิ้นสุดของข้อมูล การทวนสอบความแม่นยำของการประมาณด้วยการทำนายอายุความล้าที่อัตราส่วนภาระต่าง ๆ พบว่าอายุความล้าที่ทำนายมีค่าใกล้เคียงกับอายุความล้าจากการทดลอง สรุปได้ว่าวิธีประมาณมีความแม่นยำสูง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lovegrove, J.M., Saleh el Din , A.S. and Daoud, O.K. A novel approach to the evaluation of the constants of the crack growth rate in fatigue. Int. J. of Fracture Vol. 14 (1978) pp. R241-R245.
- [2] จีรพงศ์ กสิวิทย์อำนวย. การศึกษาผลของภาระเฉลี่ย และแอมพลิจูดภาระที่มีต่ออัตราการเติบโตของรอยร้าวเนื่องจากความล้าสำหรับวัสดุ AISI 4140. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- [3] ASTM E 647-93 Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.