

การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม ของชิ้นทดสอบความเสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน

Indirect crack length measurement for stress corrosion cracking specimen

วิชพงศ์ โสชู^{1,*}, นิตกร นรภัยพิพากษา² และ ชาวสวน กาญจน์มัย¹

¹ ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิศวกรรมและสมรรถนะของวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

² บริษัท นิตกร รีเสิร์ช พาร์ทเนอร์ จำกัด อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

*witchapong.s@gmail.com

บทคัดย่อ

ความเสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน เป็นปัญหาที่สร้างความเสียหายให้กับวัสดุทางวิศวกรรม ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของ แรงทางกล สภาพแวดล้อมกัดกร่อน และระยะเวลา ในการทำความเข้าใจกลไกของความเสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ชิ้นทดสอบแบบควบคุมการเปลี่ยนแปลงขนาด ถูกใช้ในการศึกษาปัญหาความเสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ คือการวัดความยาวรอยร้าวแบบทางตรง ไม่สามารถวัดขนาดความยาวรอยร้าวได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมและผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ร่วมกับการวัดแรงกดที่เกิดขึ้นทดสอบ และการเปิดที่ปากรอยร้าวของชิ้นทดสอบ ในการประเมินความยาวรอยร้าว ซึ่งเรียกว่าวิธีการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม เพื่อการวัดแรงกดระหว่างการทดสอบ อุปกรณ์วัดแรงกดถูกออกแบบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จัดสร้าง และตรวจสอบ ขนาดความยาวรอยร้าวที่วัดโดยวิธีทางอ้อม ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการวัดความยาวรอยร้าวทางตรง ผลที่ได้จากทั้งสองวิธีสอดคล้องกัน การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม สามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาของการวัดความยาวรอยร้าว ในการทดสอบความเสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนได้

คำหลัก: ความเสียหายจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน, ชิ้นทดสอบแบบควบคุมระยะเวลาการเคลื่อนตัว, การวัดความยาวรอยร้าว, การวัดแรงกด, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Stress corrosion cracking (SCC) is the damage of engineering material, which involves the mechanical action, corrosive environment, and time. To understand SCC mechanism, the self-deformed specimen (i.e., T-type wedge opening loaded specimen or T-WOL specimen) is used for SCC experiment. Unfortunately, the direct measurement of crack length during SCC experiment is not accurate because of the influences of liquid environment and corrosion product. In the present work, finite element analysis (FEA) as well as the measured resistance force and crack-mouth opening displacement (CMOD) were applied to estimate the crack length, i.e., an indirect crack length measurement. To measure the change of resistance force during SCC experiment, the instrumented reaction pin was numerically designed, constructed, and calibrated. Crack lengths from indirect crack length measurements were compared with those from direct measurements. Both results were in good agreement, and the present indirect crack length measurement can be used for SCC experiment with T-WOL specimen.

Keywords: stress corrosion cracking; self-deformed specimen; crack length measurement; force measurement; finite element analysis

1. บทนำ

เมื่อชิ้นส่วนทางวิศวกรรมรับแรงจากการใช้งานและสภาพแวดล้อมกัดกร่อน รอยร้าวสามารถเกิดและขยายตัว เรียกความเสียหายดังกล่าวว่าการแตกหัก เนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (stress corrosion cracking, SCC) ซึ่งความรุนแรงที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้โดยใช้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor, K) ที่เกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าว เพื่อทำความเข้าใจปัญหา SCC มาตรฐานการทดสอบ ISO 7539-6 [1] และ ASTM E1681 [2] แนะนำวิธีการทดสอบปัญหา SCC โดยใช้ชิ้นทดสอบที่มีรอยร้าวเริ่มต้นผลที่ได้จากการทดสอบ SCC ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของรอยร้าวและพารามิเตอร์ K ของวัสดุทางวิศวกรรม [3-5]

ชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ T-type wedge opening loaded specimen (T-WOL specimen) ซึ่งเป็นชิ้นทดสอบที่สามารถสร้างแรงกดได้ด้วยสกรู ถูกใช้ศึกษาปัญหา SCC อย่างแพร่หลาย ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 7539-6 พารามิเตอร์ K ของชิ้นทดสอบ T-WOL สามารถคำนวณได้จาก แรง ความยาวรอยร้าวและขนาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งพบว่าความยาวรอยร้าวเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ต่อความแม่นยำในการคำนวณอัตราการขยายตัวของรอยร้าว และพารามิเตอร์ K จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา มีวิธีหลายรูปแบบที่ถูกใช้วัดความยาวรอยร้าว เช่น การประมวลผลจากภาพ (visual inspection) [6], เพรพริก้า (replica) [7], คอมพลายแอนซ์ (compliance) [8], electrical potential [9] แต่ในระหว่างการทดสอบ SCC มีผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อนปกคลุมปลายรอยร้าว ทำให้การวัดความยาวรอยร้าวโดยตรง (direct measurement) จากกล้องจุลทรรศน์หรือการวิเคราะห์จากภาพ (visual inspection) และเทคนิค replica ไม่สามารถทำได้แม่นยำ ส่วนเทคนิคการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม (indirect crack measurement) เช่น คอม-

พลายแอนซ์ โดยใช้गेजวัดความเครียดติดที่ตำแหน่งด้านหลังของชิ้นทดสอบ หรือเทคนิค electrical potential ไม่เหมาะสมที่ใช้วัดความยาวรอยร้าวภายใต้สภาพแวดล้อมกัดกร่อนที่เป็นของเหลว

ชิ้นทดสอบแบบ T-WOL ซึ่งอาศัยการขันสกรูเพื่อทำให้เกิดแรงกดขึ้นกับชิ้นทดสอบ ดังนั้นเมื่อรอยร้าวเกิดการขยายตัวความยาวรอยร้าว แรงกดที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบจะลดลง ถ้าสามารถวัดแรงกดและระยะเคลื่อนตัวของปากรอยร้าว (crack mouth opening displacement, CMOD) ในระหว่างการทดสอบได้จะสามารถนำค่าตัวแปรทั้งสองชนิดมาใช้ในการคำนวณความยาวรอยร้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis, FEA) ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา Chung และคณะ [10] พัฒนาอุปกรณ์วัดแรงสำหรับชิ้นทดสอบ T-WOL โดยติดตั้งगेजวัดความเครียดที่แกนกลางของสกรูสร้างแรงกด แปลงค่าความเครียดเป็นแรงกดเมื่อใช้ร่วมกับ CMOD ทำให้สามารถคำนวณความยาวรอยร้าวจากความสัมพันธ์แบบอิลาสติกได้ นอกจากนี้ Vigilante และคณะ [11] พัฒนาอุปกรณ์วัดแรง โดยติดตั้งगेจวัดความเครียดที่ผิวของสกรู และ ทำการแปลงค่าความเครียดเป็นแรงที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ โดยอาศัยหลักการประมาณความยาวรอยร้าวเดียวกับ Chung และคณะ [10] พบว่า ความแม่นยำในการวัดแรงของอุปกรณ์วัดแรงขึ้นกับตำแหน่งของगेจวัดความเครียดและของชิ้นทดสอบ T-WOL

งานวิจัยฉบับนี้ได้พัฒนาเทคนิคการวัดความยาวรอยร้าวแบบทางอ้อมสำหรับชิ้นทดสอบ T-WOL เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของตำแหน่งของगेจวัดความเครียดสกรูต่อการวัดแรง สลักสะท้อนแรงถูกใช้เป็นอุปกรณ์วัดแรงกด (instrumented reaction pin) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งगेจวัดความเครียดบนสลักสะท้อนแรง หลังทำการติดตั้งगेจวัดความเครียด สลักสะท้อนแรงถูกนำไปทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงกด เพื่อหาความสัมพันธ์

ระหว่างค่าความเครียดและแรงกดที่เกิดขึ้น จากความสัมพันธ์แบบอิลาสติก-พลาสติกของชิ้นทดสอบ T-WOL แรงกดและ CMOD ที่ได้จากการวัด ถูกนำมาใช้คำนวณ FEA เพื่อหาความยาวรอยร้าว เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของความยาวรอยร้าวที่ได้โดยวิธีทางอ้อม ความยาวรอยร้าวที่ได้จากการวัดโดยวิธีทางตรง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันความแม่นยำ ก่อนนำไปใช้วัดความยาวรอยร้าวในการทดสอบ SCC

2. ชิ้นทดสอบแบบ T-WOL

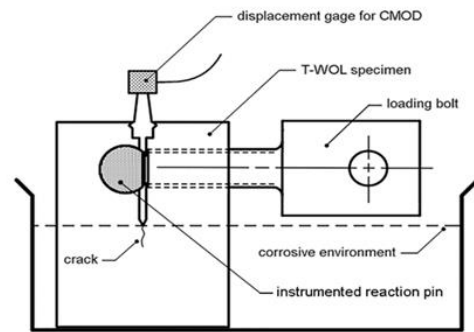
การทดสอบ SCC โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบ T-WOL แสดงดังรูปที่ 1 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ T-WOL หน้า 20 มม. ตามมาตรฐาน ISO 7539-6 [1] แสดงดังรูปที่ 2 ชิ้นทดสอบ T-WOL ถูกทำให้เกิดแรงด้วยสกรูสร้างแรงกด (loading bolt) ค่า CMOD ถูกวัดด้วยเกจวัดระยะ (displacement gage) แรงกดและ CMOD ถูกใช้ในการคำนวณความยาวรอยร้าวด้วย FEA

วัสดุ นิกเกิลอลูมิเนียมบรอนซ์ (nickel aluminium bronz, NAB) ถูกใช้ในการสร้างชิ้นทดสอบ T-WOL และสลักสะท้อนแรง (instrumented reaction pin) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากกรมอุทกหารเรือ โดยมีความเค้นดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) 547 MPa, ความเค้นคราก (yield strength) 214 MPa, โมดูลัสของยัง (Young's modulus) 120 GPa การวัดความยาวรอยร้าวทำได้โดยเฉลี่ยความยาวรอยร้าวจากทั้ง 2 ด้านของชิ้นทดสอบ

3. อุปกรณ์วัดแรงกด

3.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สลักสะท้อนแรงถูกออกแบบให้เป็นอุปกรณ์วัดแรงกด โดยความเค้นที่เกิดกับสลักสะท้อนแรงต้องไม่เกินความเค้นครากของวัสดุ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความเครียดที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

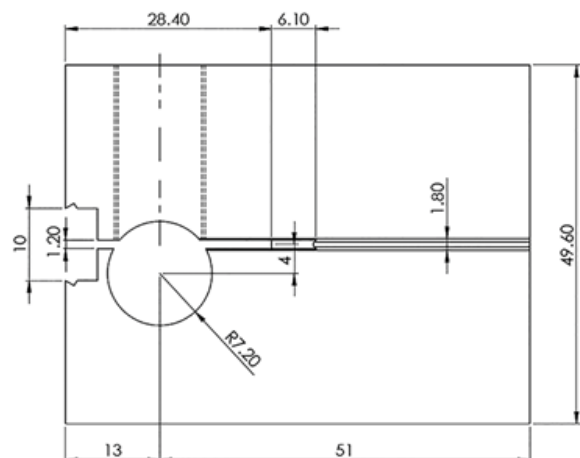


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 การทดสอบ SCC โดยใช้ชิ้นทดสอบแบบ T-WOL
(ก) แผนภาพแสดงรายละเอียดชิ้นส่วนต่างๆ
(ข) ภาพถ่ายการทดสอบ SCC



รูปที่ 2 รูปร่างและขนาดของชิ้นทดสอบ T-WOL

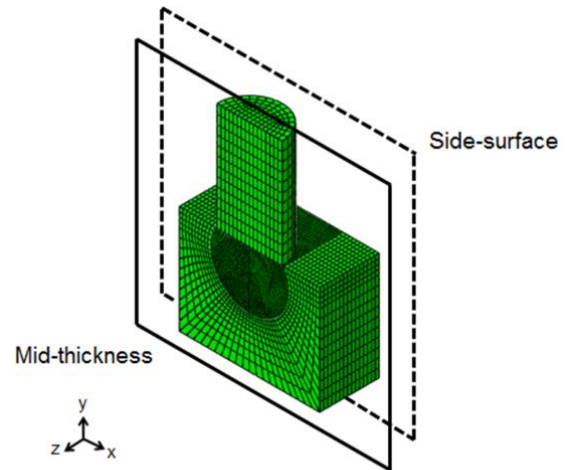
เมื่อสลักสะท้อนแรงถูกนำไปใช้งาน แรงกดที่เกิดขึ้นคำนวณได้จากความเครียด ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้ในการคำนวณ หาดำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งเกจวัดความเครียด

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยซอฟต์แวร์ ABAQUS [12] ถูกใช้ในการคำนวณความเค้น Von Mises และความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อสลักสะท้อนแรงถูกแรงกดกระทำ เนื่องจากสลักสะท้อนแรงมีความสมมาตรจึงคำนวณแบบครึ่งแบบจำลอง โดยใช้เอลิเมนต์แบบ quadratic hexahedral แสดงดังรูปที่ 3 (ก) แรงกดขนาด 10,000 N ถูกกดลงบนสลักสะท้อนแรงผ่านหัวกดทรงกระบอก (cylindrical part) สลักสะท้อนแรงซึ่งวางอยู่บนตัวรองรับ (support) จำนวนและขนาดของเอลิเมนต์ของแบบจำลองถูกปรับจนไม่ส่งผลกระทบต่อความเค้น Von Mises มีจำนวน 50,352 เอลิเมนต์ (216,307 โหนด) และเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลอง มีขนาด 0.3-1.5 มม.

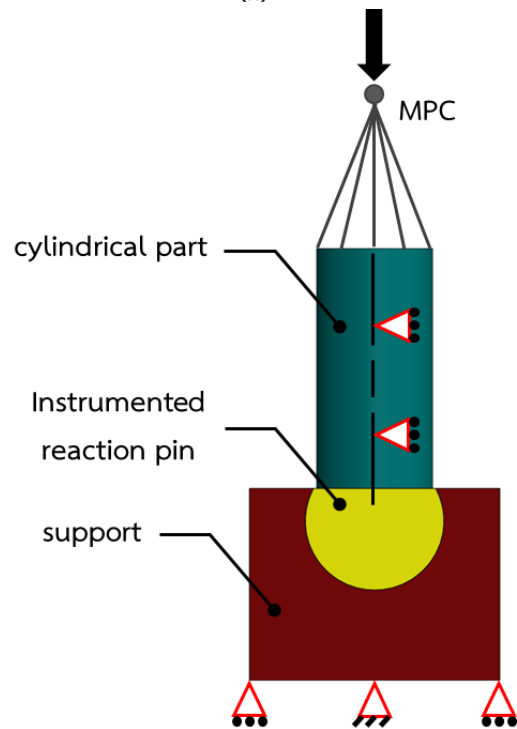
ตำแหน่งของแรงกดถูกสร้างขึ้น โดยใช้คำสั่ง multipoint constrain (MPC) ขอบเขตเงื่อนไขแสดงดังรูปที่ 3(ข) เนื่องจากวัสดุเหล็กกล้ามีค่าความทนทานหรือ K_{Ic} อยู่ที่ประมาณ $25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และรอยร้าวที่สั้นที่สุดในการศึกษานี้คือ $a/W = 0.4$ (a = ความยาวรอยร้าว, W = ความกว้างของชั้นทดสอบ 51 มม.) ดังนั้นสลักสะท้อนแรงรับแรงกดสูงสุด 10,000 N ระหว่างการทดสอบ SCC แรงกดตั้งแต่ 0 ถึง 10,000 ถูกคำนวณผ่าน 100 ขั้นตอนระหว่างการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลของการคำนวณ (รูปที่ 4) แสดงให้เห็นว่าความเค้น Von Mises ที่เกิดขึ้น มีค่าไม่เกินความเค้นครากของวัสดุและการกระจายตัวของความเครียดที่แกนกลางของสลักสะท้อนแรงแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าความเครียดที่แกนกลาง (axial strain) ของสลักสะท้อนแรงมีค่าสูงและการกระจายตัวคงที่ที่ระยะ 6-8 มม. จากด้านล่าง ดังนั้นเกจความเครียดขนาด 1 มม. (TML: BTM-

1C) จำนวน 1 ถูกติดตั้งที่ระยะ 6.5-7.5 มม. จากด้านล่างและในแนวแกนกลางของสลักสะท้อนแรง



(ก)

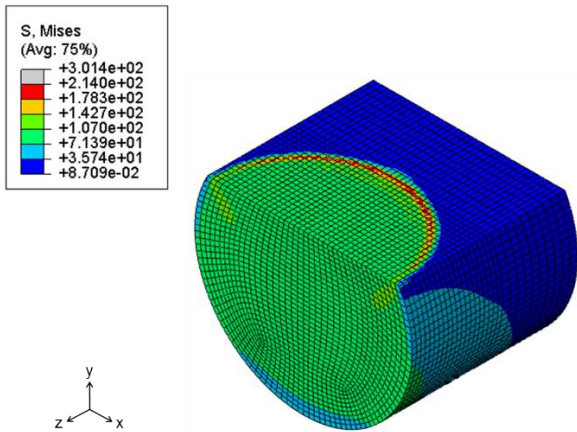


(ข)

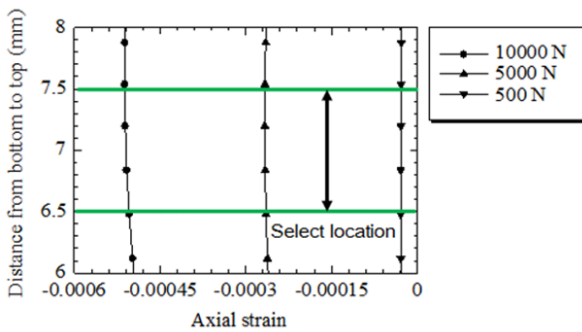
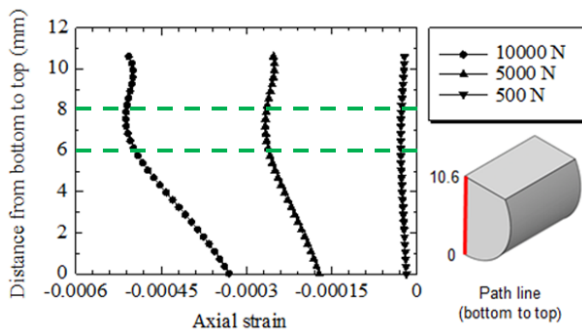
รูปที่ 3 แบบจำลอง 3 มิติ ของสลักสะท้อนแรง:

(ก) รายละเอียดเมช (ข) ขอบเขตเงื่อนไข

AMM - 001



รูปที่ 4 การกระจายตัวของความเค้น Von Mises บน
สลักสะท้อนแรงที่แรงกด 10,000 N

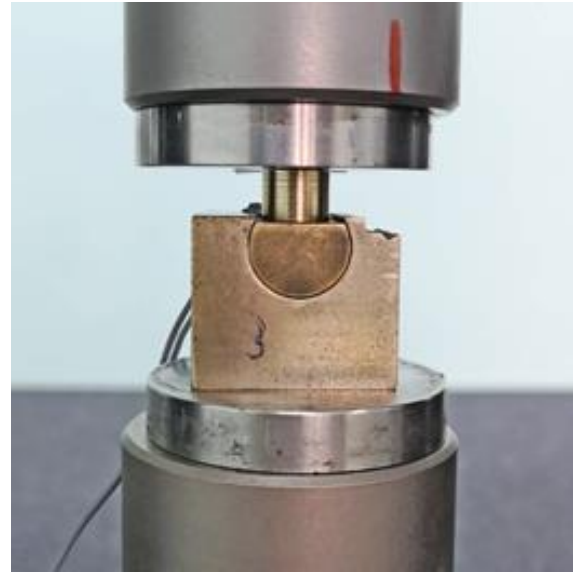


รูปที่ 5 ความเครียดที่ตำแหน่งของสลักสะท้อนแรง เมื่อมี
แรงกดมากกระทำ

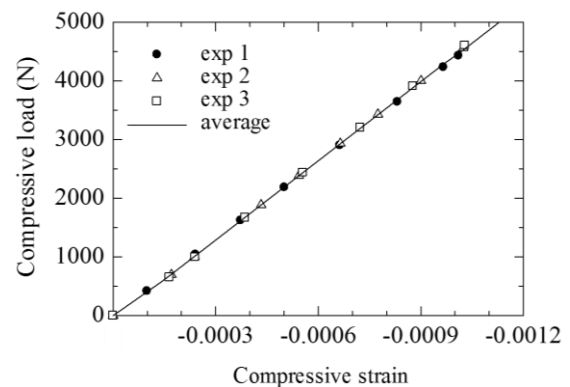
3.2 การวัดขนาดแรงกดของสลักสะท้อนแรง

สลักสะท้อนแรงถูกติดตั้งบนเครื่องทดสอบแรงกด (Universal testing Machine - Instron: 5969) เพื่อวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับความเครียดที่เกิดขึ้นบนสลักสะท้อนแรง ดังรูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดของสลักสะท้อนแรง จากการทดสอบ 3 ครั้ง รูปที่ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงกดและ

ความเครียดแสดงให้เห็นว่า สลักสะท้อนแรงมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอิลาสติก และการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง ให้ผลที่ตรงกัน ดังนั้นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบทั้ง 3 ครั้ง ถูกใช้ในการแปลงความเครียดเป็นแรงกด



รูปที่ 6 การทดสอบการวัดแรงกดของสลักสะท้อนแรงบน
เครื่องทดสอบแรงกดทางกล



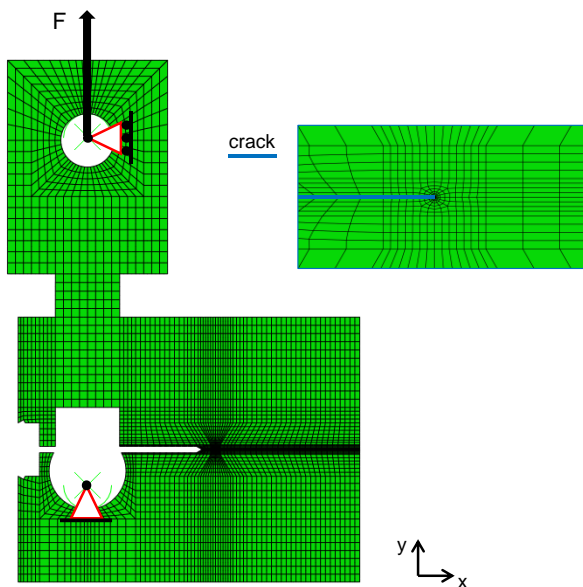
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดของ
สลักสะท้อนแรงที่สร้างจาก NAB

4. การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม

4.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

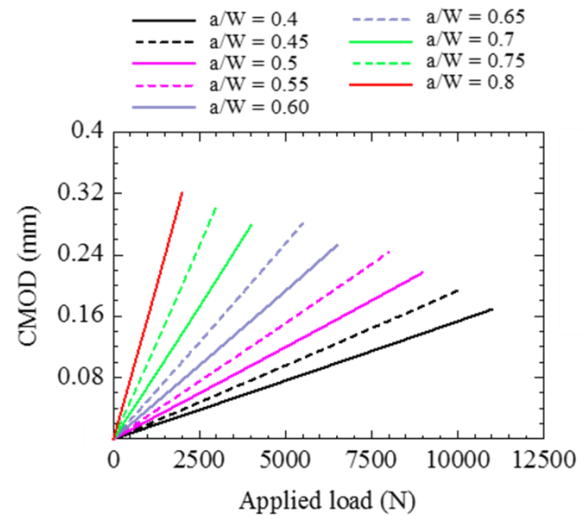
แรงกดที่วัดได้จากสลักสะท้อนแรงและ CMOD ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะเคลื่อนตัวถูกใช้ในการ

คำนวณความยาวรอยร้าวด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลอง 2 มิติ อีลาสติก-พลาสติก แบบความเครียดระนาบ ถูกใช้ในการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างแรงและ CMOD ที่อัตราส่วนความยาวรอยร้าว (a) ต่อความกว้างของชิ้นทดสอบ (W) ระหว่าง $0.4 \leq a/W \leq 0.8$ โดยใช้ซอฟต์แวร์ ABAQUS [12] เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบ quadratic hexahedral รายละเอียดแบบจำลองและขอบเขตเงื่อนไขแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองของชิ้นทดสอบ T-WOL

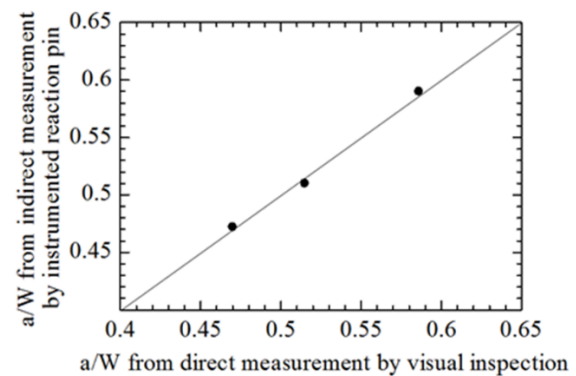
ในระหว่างการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แรงตั้งแต่ศูนย์ไปถึงแรงสูงสุดถูกคำนวณผ่าน 100 ขั้นตอน จำนวนและขนาดเอลิเมนต์ถูกปรับจนไม่ส่งผลกระทบต่อความเค้น Von Mises ที่เกิดขึ้นที่ปลายรอยร้าว แบบจำลองมีจำนวนเอลิเมนต์ 4,650 เอลิเมนต์ (14,540 โหนด) และขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณปลายรอยร้าวมีขนาดระหว่าง 0.02 ถึง 0.05 มม. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและ CMOD ของชิ้นทดสอบ T-WOL ที่ $0.4 \leq a/W \leq 0.8$ แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งผลที่ได้ถูกนำไปใช้วัดความยาวรอยร้าวบนชิ้นทดสอบ T-WOL จากแรงกดที่วัดได้จากสลักสะท้อนแรงและ CMOD ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดระยะเคลื่อนตัว



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับ CMOD

4.2 การวัดความยาวรอยร้าว

ชิ้นทดสอบ T-WOL ที่มีความยาวรอยร้าวที่แตกต่างกัน 3 ชิ้นทดสอบ ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม ชิ้นทดสอบ T-WOL ถูกทำให้เกิดระยะเคลื่อนตัวโดยการขึ้นสกรู จากนั้นถูกวัดความยาวรอยร้าว โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า ในขณะที่แรงที่เกิดกับชิ้นทดสอบถูกวัดด้วยสลักสะท้อนแรง และ CMOD ถูกวัดด้วยเซนเซอร์วัดระยะการเคลื่อนตัว การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางตรงด้วยกล้องจุลทรรศน์เปรียบเทียบกับ การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อมเปรียบเทียบกับ การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางตรง

การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อมให้ผลที่สอดคล้องกับการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางตรง ความแตกต่างของการวัดความยาวรอยร้าวจากทั้งสองวิธีมีค่าไม่เกิน 1% ดังนั้นการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อมกับขั้นตอนทดสอบ T-WOL มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการวัดความยาวรอยร้าวระหว่างการทดสอบ SCC

5. การวิจารณ์ผล

จากพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงคอมพลาเยนซ์ของขั้นตอนทดสอบแบบอิลาสติก Chung และคณะ [10] และ Vigilante และคณะ [11] ได้ทำการคำนวณความยาวรอยร้าวจากการวัดแรงและ CMOD ของขั้นตอนทดสอบ T-WOL ซึ่งถูกนำเสนอในรูปแบบการคำนวณที่แตกต่างกันดังนี้ Chung และคณะ [10]:

$$36.845(a/W)^4 - 64.677(a/W)^3 + 42.314(a/W)^2 - 8.097(a/W) + 3.453 = \ln(EBV/P) \quad (1)$$

Vigilante และคณะ [11]:

$$a/W = 1 - 3.91Z - 4.77Z^2 + 32.03Z^3 \quad (2)$$

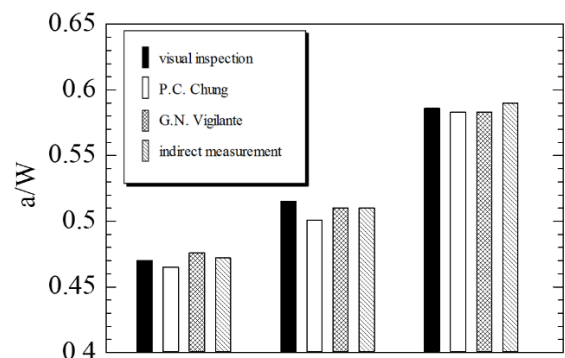
$$Z = 1/(EBV/P)^{1/2} \quad (3)$$

เมื่อ E คือมอดูลัสของยัง, B คือ ความหนา, V คือ ระยะเคลื่อนตัวที่ปากรอยร้าว (CMOD) และ P คือแรง

เนื่องจากความเค้นซิงกูลาริตี (singularity) ที่ปลายรอยร้าวสามารถทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่บาง มีรอยร้าวขนาดใหญ่ ๆ และรับแรงสูง ทำให้การใช้สมมติฐานคอมพลาเยนซ์แบบอิลาสติกในการคำนวณขนาดของรอยร้าวไม่ถูกต้อง ดังนั้นสมมติฐานการเปลี่ยนแปลงคอมพลาเยนซ์แบบอิลาสติกพลาสติก ทำให้การวัดความยาวรอยร้าวมีความแม่นยำขึ้น

ผลการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 11 และความแตกต่างของความยาวรอยร้าวที่ได้

จากวิธีต่าง ๆ เมื่อเทียบกับการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางตรงหรือการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสดงดังตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างเพียงเล็กน้อยที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามว่าวิธีการวัดความยาวรอยร้าวโดยทางอ้อมบนสมมติฐานของการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอิลาสติกพลาสติก ให้ผลการวัดความยาวรอยร้าวที่ใกล้เคียงกับผลจากวิธีทางตรงกว่าผลจากสมมติฐานคอมพลาเยนซ์แบบอิลาสติก [10, 11]



รูปที่ 11 ผลการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีต่าง ๆ

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาการใช้สลักสะท้อนแรงวัดแรงที่เกิดกับขั้นตอนทดสอบ T-WOL แรงที่วัดจากสลักสะท้อนแรงและ CMOD ที่วัดจากเซนเซอร์วัดระยะเคลื่อนตัว ถูกใช้ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวัดความยาวรอยร้าว การวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อม ให้ผลสอดคล้องกับการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางตรงด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นการวัดความยาวรอยร้าวด้วยวิธีนี้ สามารถนำไปใช้วัดความยาวรอยร้าวที่เกิดขึ้น ระหว่างการทดสอบการแตกหักเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก (1) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ (2) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ตารางที่ 1 ความยาวรอยร้าวโดยวิธีทางอ้อมเปรียบเทียบกับการวัดความยาวรอยร้าวโดยวิธีตรง

Indirect measurement	Direct measurement					
	a/W = 0.470		a/W = 0.515		a/W = 0.586	
	a/W	% difference	a/W	% difference	a/W	% difference
Chung et al. [10]	0.465	1.1	0.501	2.7	0.583	1.4
Vigilante et al. [11]	0.476	1.3	0.510	1.0	0.583	0.9
Present work	0.472	0.4	0.510	1.0	0.589	0.5

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ISO 7539-6: Corrosion of metal and alloys - Stress corrosion testing, Part 6 - Preparation and use of pre-cracked specimens, ISO Standardsed., 1989.

[2] ASTM E1681-03: Standard test method for determining a threshold stress intensity factor for environment-assisted cracking of metallic materials, in Annual Book of ASTM Standardsed. Volume 3.02. 2003.

[3] Moody, N.R., et al., Temperature effects on hydrogen-induced crack growth susceptibility of iron-based superalloys. Engineering Fracture Mechanics, 2001. 68: p. 731-750.

[4] Koul, M. and J. Gaies, An Environmentally Assisted Cracking Evaluation of UNS C64200 (Al-Si-Bronze) and UNS C63200 (Ni-Al-Bronze). J Fail. Anal. and Preven, 2013. 13: p. 8-19.

[5] Padekar, B.S., V.S. Raja, and R.K.S. Raman, Stress corrosion cracking of a wrought Mg-Mn alloy under plane strain and plane stress condition. Engineering Fracture Mechanics, 2013. 102: p. 180-193.

[6] Anderson and Clark, R., Inspection of Metals: Visual Examination. American Society for Metals Intl. ASM Materials. Vol. 1. 1983.

[7] ASTM E1351-01: Standard Practice for Production and Evaluation of field Metallographic Replicas, ASTM International: West Conshohocken PA. 2012.

[8] Saxena, A. and Hudak, J. S.J., Review and extension of compliance information for common crack growth specimens. International Journal of Fracture, 1978. 14(5): p. 453-467.

[9] Watt, K.R., Consideration of an a.c. potential drop method for crack length measurement. The measurement of crack length and shape during fracture and fatigue. Beevers, C.J., Ed. EMAS, Cradley Heath, UK. 1980.

[10] Chung, P.C., G. Cragnolino, and D.D. Macdonald, Instrumented Loading Devices for Monitoring Environmentally Assisted Crack Growth in High Temperature Aqueous Systems. CORROSION, 1985. 41(3): p. 179-183.

[11] Vigilante, G.N., J.H. Underwood, and D. Crayon, Use of the Instrumented Bolt and Constant Displacement Bolt-Loaded Specimen to Measure in-situ Hydrogen Crack Growth in High Strength Steels. Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume, in American Society of Testing of Materials., 2000: West Conshohocken P.A. p. 377-387.

[12] ABAQUS User's Manual. 2016: ABAQUS Inc.

[13] Olszewski, A.M., Dealloying of a nickel-aluminium bronze impeller. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2008. 8: p. 505-508.