

# การคำนวณอายุการล้าของชิ้นงานโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

ดร. จำลอง ลิ้มตระกูล\*

[รับตีพิมพ์เมื่อ วันที่ 27 มีนาคม 2532]

## 1. บทนำ

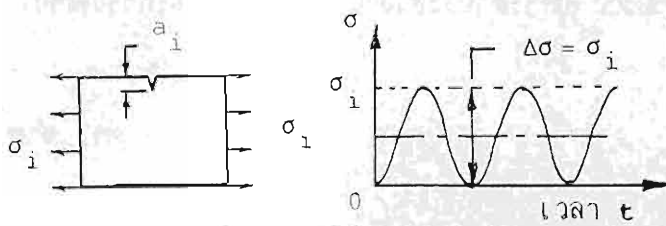
กลศาสตร์การแตกหักเป็นวิชาที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและรูปร่างของรอยร้าว ความเค้นระบุเนื่องจากภาระที่มากกระทำ และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน โดยเริ่มต้นสมมติให้ชิ้นงานเกิดมีรอยร้าวขนาดเล็ก ขึ้นอยู่ก่อนการใช้งาน หรือในระหว่างการใช้งาน ในบทความที่ผ่านมา [1,2] ได้กล่าวถึงหลักเบื้องต้นของกลศาสตร์การแตกหัก และบทบาทของกลศาสตร์การแตกหักที่มีต่อการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ในบทความนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณอายุการล้าของชิ้นงานที่มีรอยร้าวเริ่มแรก และอยู่ภายใต้ความเค้นแบบวัฏจักร โดยใช้กลศาสตร์การแตกหักสำหรับวัสดุแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Fracture Mechanics LEFM)

พิจารณาชิ้นงาน 3 ชิ้น แต่ละชิ้นมีรูปร่างเหมือนกันและมีรอยร้าวเริ่มต้น  $a_i$  รับภาระแบบวัฏจักรซึ่งกระทำซ้ำทิศทางเดียวจาก 0 ถึง  $\sigma_1$  (เช่นดังในรูปที่ 1 ก) ชิ้นงานที่รับภาระสูงจะมีอัตราการขยายตัวของรอยร้าวสูงและมีอายุสั้น ขนาดรอยร้าวในชิ้นงานที่ขาดจะมีค่าต่ำลง เมื่อความเค้นที่กระทำมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอายุการล้าของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับ ขนาดเริ่มต้นของรอยร้าว ความเค้นระบุเนื่องจากภาระที่มากกระทำ และความต้านทานการแตกหักของวัสดุ รูปที่ 1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความยาวของรอยร้าว กับจำนวนครั้งที่ความเค้นกระทำตลอดอายุการใช้งานของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น

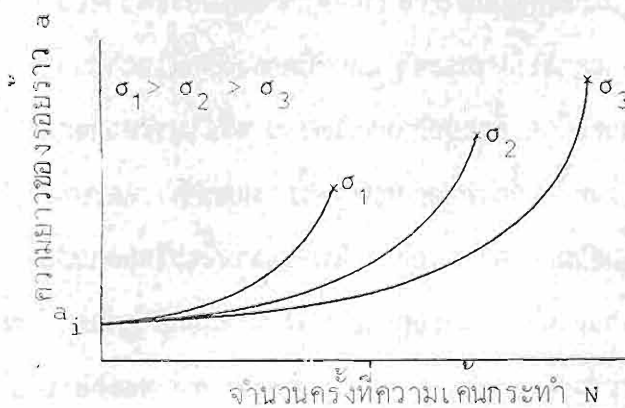
คำถามมีอยู่ว่า เราจะนำเอาข้อมูลเช่นดังในรูปที่ 1) ไปใช้ในการออกแบบชิ้นงานเพื่อรับภาระแบบวัฏจักร และมีการล้าได้อย่างไร? ความสัมพันธ์ดังในรูปที่ 1) ไม่เหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบชิ้นงานที่รับภาระแบบมีการล้าทั่วไป ยกเว้นแต่เฉพาะชิ้นงานที่รับภาระแบบเดียวกันเท่านั้น ดังนั้นจึงได้มีการนำเอากลศาสตร์การแตกหักสำหรับวัสดุแบบเชิงเส้นไปประยุกต์เข้ากับ

---

\* รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



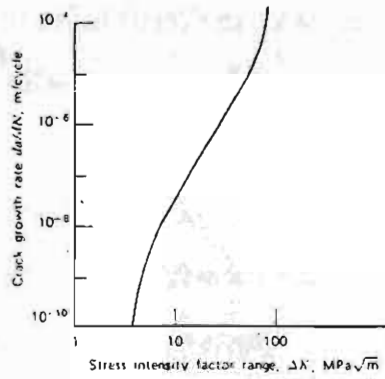
ก) ชิ้นงานซึ่งมีรอยร้าวเริ่มต้น  $a_i$  อยู่ภายใต้การกระทำแบบวัฏจักรกระทำซ้ำที่สลับเดียวจาก 0 ถึง  $\sigma_i$



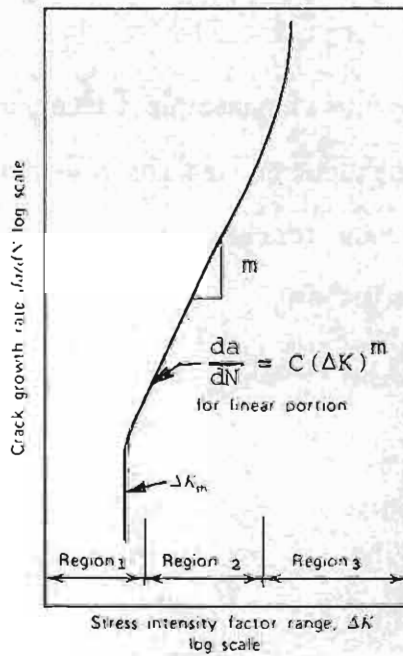
ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $a$  และ  $N$  ที่ค่า  $\sigma_i$  ต่าง ๆ

รูปที่ 1

ข้อมูลในรูปที่ 1) เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ เช่นดังในรูปที่ 2) [3] ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญสองตัวคือ อัตราการขยายตัวของรอยร้าวต่อวัฏจักร  $da/dN$  และผลต่างของความเค้นเฉือน  $\Delta K (=K_{max} - K_{min})$  กราฟเช่นดังในรูปที่ 2) มีชื่อเรียกว่า Sigmoidal แต่เนื่องจาก  $\Delta K$  เป็นฟังก์ชันของผลต่างของความเค้น  $\Delta\sigma (= \sigma_{max} - \sigma_{min})$  และขนาดของรอยร้าว  $a$  ดังนั้นเราจึงสามารถหาอายุการล้าของชิ้นงานที่มีรอยร้าวเริ่มแรก และมีความเค้นแบบวัฏจักรกระทำได้โดยทำการอินทิเกรตกราฟ Sigmoidal ดังในรูปที่ 2) นอกจากนี้ความยาวรอยร้าวขณะที่รอยร้าวเริ่มขยายตัว สามารถคำนวณได้จากค่าความเค้นเฉือนวิกฤต  $K_{IC}$  หรือ  $K_{IC}$  ซึ่งเป็นค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ



รูปที่ 2 ลักษณะของกราฟ Sigmoidal สำหรับชิ้นงานดังในรูปที่ 1 ก)



รูปที่ 3 ช่วงของบริเวณที่ 1, 2 และ 3 ในกราฟ Sigmoidal [ da/dN vs ΔK ]

## 2. การขยายตัวของรอยร้าวภายใต้การะแบวมักจัก

กลศาสตร์การแตกหักสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น สามารถใช้ทำนายอัตราการขยายตัวของรอยร้าวในชิ้นงานซึ่งรับภาระแบบมีกรล้า และโดยทั่วไปนิยมใช้ในรูปแบบของ  $da/dN$  และ  $\Delta K$  เช่นดังในรูปที่ 2) หรือ 3) ในมาตราส่วนล็อก-ล็อก กราฟนี้มีรูปเป็น sigmoidal และสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ดังนี้คือ

- ก. บริเวณที่ 1 เป็นบริเวณที่กำหนดค่า  $\Delta K$  ต่ำสุดหรือค่า  $\Delta K_{th}$  ซึ่งที่ค่าต่ำกว่านี้รอยร้าวจะไม่เกิดการขยายตัว สำหรับโลหะส่วนมากค่า  $\Delta K_{th}$  จะมีค่าประมาณจาก  $2 \times 10^{-5}$  ถึง  $3 \times 10^{-5}$  คูณด้วยค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (E) หรือที่ค่าอัตราการขยายตัวของรอยร้าว  $da/dN \approx 2.5 \times 10^{-10}$  m/cycle หรือน้อยกว่า
- ข. บริเวณที่ 2 เป็นบริเวณที่  $da/dN$  และ  $\Delta K$  ในมาตราส่วน ล็อก-ล็อกสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรงตามสมการของ Paris-Erdogan ดังนี้คือ

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad \dots\dots 1)$$

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots\dots 2)$$

$$\Delta K = Y\sigma_r\sqrt{\pi a} \quad \dots\dots 3)$$

โดยที่ C และ m เป็นค่าคงที่ของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมและระดับความเค้นตกค้างที่อยู่ในชิ้นงาน โดยทั่วไป m มีค่าจาก 2 ถึง 4 หรือสูงกว่า K ค่าความเค้นเข้มข้น (Stress intensity factor) ของรอยร้าวในชิ้นงานที่มีขนาดไม่จำกัด

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \text{ และ } K_{min} = 0 \text{ ถ้า } \sigma_{min} \text{ เป็นความเค้นกดหรือความเค้นอัด}$$

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

ตารางที่ 1) แสดงค่า  $\Delta K_{วิกฤต}$  (คือ  $\Delta K_{th}$ ) C และ m สำหรับโลหะชนิดต่างๆในระบบเอสไอ [4]

- ค. บริเวณที่ 3 อัตราการขยายตัวของรอยร้าวมีค่าสูงมาก และอายุการล้าที่เกี่ยวข้องของก็มีค่าน้อย (ดูรูปที่ 1) ประกอบ) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $da/dN$  และ  $\Delta K$  บริเวณนี้ จะถูกควบคุมโดยค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ  $K_{IC}$

ตารางที่ 1 ค่า  $K_{th}$ ,  $C$  และ  $m$  สำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ [4]

วัสดุ	$\Delta K_{TH}$ ( $MN m^{-3/2}$ )	$m$	$C^*$ ( $\times 10^{-11}$ )
Mild steel	3.2-6.6	3.3	0.24
Structural steel	2.0-5.0	3.85-4.2	0.07-0.11
Structural steel in sea-water	1.0-1.5	3.3	1.6
Aluminium	1.0-2.0	2.9	4.56
Aluminium alloy	1.0-2.0	2.6-3.9	3-19
Copper	1.8-2.8	3.9	0.34
Titanium	2.0-3.0	4.4	68.8

\* Units of  $C$  will give  $da/dN$  in m/cycle when  $\Delta K$  is in  $MN m^{-3/2}$

ลักษณะการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากการล้าเช่นดังในรูปที่ 3) จะเหมือนกันหมดถึงแม้ว่าขึ้นทดสอบหรือวัสดุจะต่างกันก็ตาม ทั้งนี้เพราะตัวแปรที่สำคัญคือผลต่างของค่า  $K$  หรือ  $\Delta K$  ดังนั้น เราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $da/dN$  และ  $\Delta K$  ของขึ้นทดสอบอย่างง่ายที่อยู่ภายใต้ภาวะแบบสม่ำเสมอ และนำเอาข้อมูลไปใช้ในการออกแบบได้ เมื่อทราบสมการของ  $K$  หรือ  $K_I$  สำหรับชิ้นงาน เราก็สามารถหาอายุการล้าของชิ้นงานได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ 1) ระหว่างรอยร้าวเริ่มต้นและสุดท้าย สมการที่ 1) เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบชนิด ปลอดภัยจากการวิบัติ ของเครื่องบิน อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบพลังงานนิวเคลียร์ และยานยนต์ต่าง ๆ

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่าง $da/dN$ และ $\Delta K$ กรณีอัตราส่วนความเค้น $R=0$

การทดสอบเพื่อหาค่าอายุการล้า หรือพิกัดความทนทาน ( $\sigma_n$ ) โดยทั่วไปขึ้นทดสอบจะอยู่ภายใต้ภาวะแบบความเค้นกระทำซ้ำสองทิศทาง ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความเค้น  $\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = R = -1$  แต่ในการทดสอบเพื่อหาค่าการขยายตัวของรอยร้าวแบบมีการล้า ความเค้นดึงที่กระทำจะมีลักษณะซ้ำทิศทางเดียวซึ่ง  $R = 0$  ทั้งนี้เพราะในช่วงที่มีความเค้นกดกระทำกับชิ้นงาน รอยร้าวจะไม่ขยายตัวและค่า  $K$  ที่ปลายรอยร้าวจะไม่มี บริเวณที่ 2 และ 3 ในกราฟ sigmoidal เป็นบริเวณที่มีความสำคัญสำหรับการใช้งานและได้รับความสนใจมาก จนถึงกับมีมาตรฐานของ ASTM สำหรับเก็บข้อมูลอัตราการขยายตัวของรอยร้าวที่สูงกว่า  $10^{-8}$  m/cycle อย่างไม่ก็สมการของ Paris-Erdogan สำหรับกรณี  $R = 0$  ได้รับความสนใจมากที่สุด

Barsom [5] ได้ทำการศึกษาอัตราการขยายตัวของรอยร้าวตามสมการที่ 1) สำหรับเหล็กกล้าหลายชนิด โดยมีค่าความเค้นครากอยู่ในช่วงจาก 250 ถึง 2070  $MN/m^2$  เขาพบว่าสำหรับเหล็กกล้าแบบ ferritic-pearlitic ที่อยู่ภายใต้  $\Delta K_I$  ค่าเดียวกัน อัตราการขยาย

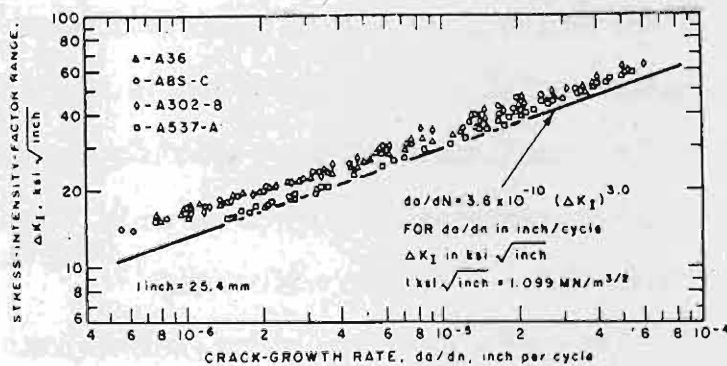
ตัวของรอยร้าวอาจจะมีช่วงกระจายของข้อมูลเปลี่ยนไปถึง 2 เท่า เช่นดังในรูปที่ 4) นอกจากนี้ Barsom ยังพบการกระจายของข้อมูลในลักษณะคล้ายคลึงกันสำหรับเหล็กกล้าแบบ martensitic เช่นดังในรูปที่ 5) เขาได้เสนอสมการสำหรับใช้ในการออกแบบ (เมื่อไม่มีข้อมูลจริงจากการทดลอง) ไว้ดังนี้คือ

ชนิดของเหล็กกล้า	สมการใช้งาน [da/dN เป็น m/cycle]
Ferritic - Pearlitic	$da/dN = 6.90 \times 10^{-12} \Delta K^{3.0}$ .....4)
Martensitic	$da/dN = 1.35 \times 10^{-10} \Delta K^{2.25}$ .....5)
Austenitic Stainless steel	$da/dN = 5.60 \times 10^{-12} \Delta K^{3.25}$ .....6)

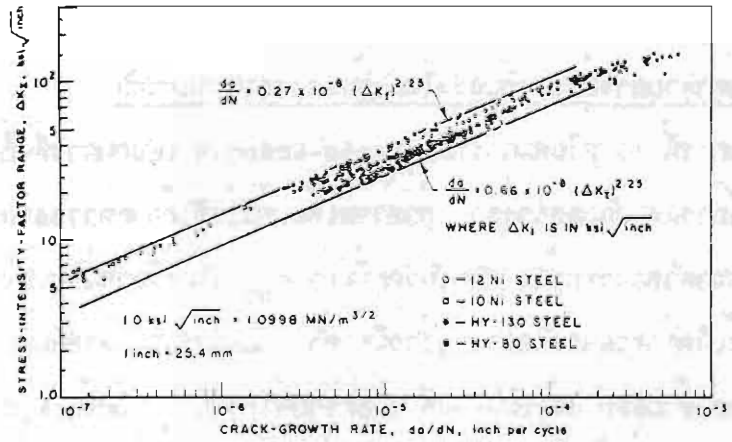
อิทธิพลของความเค้นเฉลี่ยที่มีต่อลักษณะการขยายตัวของรอยร้าว แสดงให้เห็นในรูปที่ 6) ซึ่งตัวแปรที่สำคัญก็คือ อัตราส่วนความเค้น  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$  [ซึ่ง =  $\frac{K_{min}}{K_{max}}$  ด้วย] เมื่อความเค้นเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะมีแนวโน้มทำให้อัตราการขยายตัวของรอยร้าวมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ ส่วนของกราฟ Sigmoidal และโดยทั่วไปอิทธิพลของการเพิ่มค่า R ในบริเวณที่ 2 จะน้อยกว่าบริเวณที่ 1 และ 3 อิทธิพลของค่า R ที่มีต่อสมการของ Paris ที่ใช้กันมากก็คือสมการของ Forman [6] ซึ่งมีรูปเป็นดังนี้

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad \text{.....7)}$$

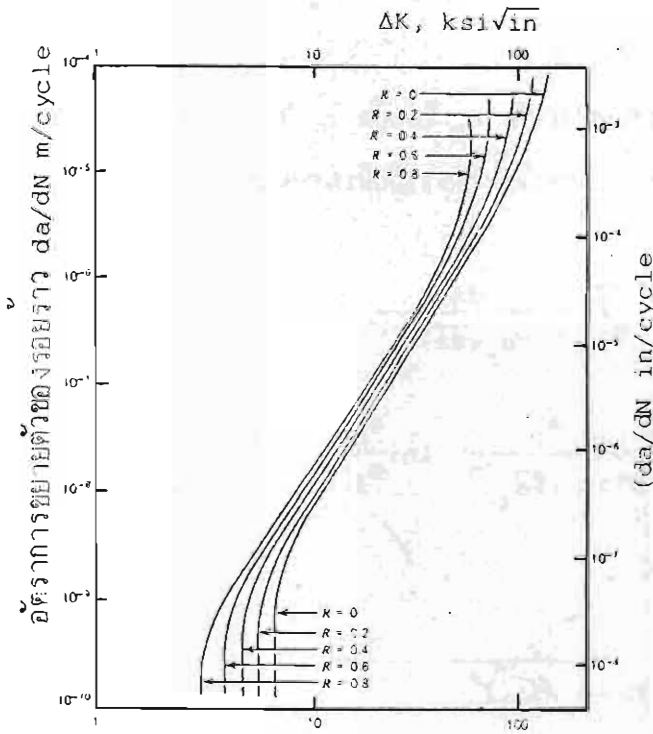
โดยที่  $K_C$  = ค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ สำหรับความหนาที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4 อัตราการขยายตัวของรอยร้าวตามสมการที่ 4) สำหรับเหล็กกล้าชนิด Ferritic-Pearlitic [5]



รูปที่ 5 อัตราการขยายตัวของรอยร้าวตามสมการที่ 5).  
สำหรับเหล็กกล้าชนิด Martensitic [5]



ช่วงของความเค้นเฉือน  $\Delta K \text{ MN}^{-3/2}$

รูปที่ 6 อิทธิพลของความเค้นเฉือนที่มีต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าวแบบลา [6]

4. การคำนวณหาอายุการล้าของชิ้นงานโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

สมการที่ 1) หรือสมการของ Paris-Erdogan เป็นสมการที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างกลศาสตร์การแตกหักและการล้า ค่าความเค้นเข้มข้นที่ได้จากตารางวัสดุ สามารถใช้ได้กับอัตราการขยายตัวของรอยร้าว สำหรับวัตถุที่มีค่า  $\sigma_{ut}$  ค่าเค้นมีความเหนียวสูง ทั้งนี้เพราะค่า  $K$  ที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวมีค่าต่ำ และบริเวณพลาสติกที่ปลายรอยร้าวมีขนาดเล็กมากสามารถใช้ LEFM ได้เป็นอย่างดี เมื่อทราบค่าความเค้นเข้มข้น  $K_I$  สำหรับการใช้งานในสภาพต่าง ๆ อายุการใช้งานของชิ้นงานในช่วงที่เหลือ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่

1) ระหว่างรอยร้าวเริ่มแรก ( $a_i$ ) และรอยร้าวสุดท้าย ( $a_f$ ) ดังต่อไปนี้:

แทนค่าจากสมการที่ 3) ลงในสมการที่ 1)

$$da/dN = C [Y\sigma_r \sqrt{\pi a}]^m \quad \dots\dots 8)$$

เมื่อรอยร้าวขยายจาก  $a_i$  ไปเป็น  $a_f$  ในช่วงอายุการใช้งาน  $N_f$  ครั้ง ชิ้นงานก็จะเกิดการแตกหัก ซึ่งสามารถหาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 8) ดังนี้

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C [Y\sigma_r \sqrt{\pi a}]^m} \quad \dots\dots 9)$$

$$\therefore N_f = \begin{cases} \frac{a_i}{C [Y\sigma_r \sqrt{\pi a_i}]^m} \ln\left(\frac{a_f}{a_i}\right) & m = 2 \\ \frac{a_i}{C [Y\sigma_r \sqrt{\pi a_i}]^m} \frac{2}{(m-2)} \left[ 1 - \left(\frac{a_i}{a_f}\right)^{\frac{m}{2}-1} \right] & m > 2 \end{cases} \quad \dots\dots 10)$$

และ  $a_f = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{IC}}{Y\sigma_{max}} \right]^2 \quad \dots\dots 11)$

สมการที่ 10) เป็นอายุการล้าของชิ้นงาน ที่อินทิเกรตได้จากสมการของ Paris-Erdogan เมื่อ  $Y \neq Y(a)$  ซึ่งเป็นกรณีเฉพาะเท่านั้น สำหรับกรณีทั่ว ๆ ไปที่  $Y = Y(a)$  สมการที่ 10) จะกลายเป็นสมการที่ 12) ดังนี้

$$N_f = \frac{1}{C [\sigma_r \sqrt{\pi}]^m} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{[Y\sqrt{a}]^m} \quad \dots\dots 12)$$



เพื่อเป็นแนวทางในการใช้สมการที่ 1) หรือ 10) สำหรับหาอายุการล้าของชิ้นงาน เมื่อรอยร้าวขยายตัวจาก  $a_i$  ไปเป็น  $a_f$  ในระหว่างการใช้งาน  $N_f$  ครั้ง ในที่นี้จะขอแสดงตัวอย่างให้ดูดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 ชิ้นงานแผ่นแบนเรียบรับภาระแบบวัฏจักรในแนวแกนเดียว โดยมีความเค้นขนาดคงที่เปลี่ยนจาก  $\sigma_{max} = 180 \text{ MN/m}^2$  ไปเป็น  $\sigma_{min} = -40 \text{ MN/m}^2$  คุณสมบัติของแผ่นเหล็กกล้าโลหะที่ใช้งานมีดังนี้คือ  $\sigma_{ut} = 600 \text{ MN/m}^2$   $E = 207 \text{ GN/m}^2$  และ  $K_{IC} = 100 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$  ถ้าชิ้นงานมีขนาดกว้างไม่จำกัด และมีรอยร้าวทะลุตลอดความหนาที่ขอบเล็ก  $a_i = 0.5 \text{ mm}$  จงคำนวณหาอายุการล้าของชิ้นงาน

วิธีทำ อายุการล้าของชิ้นงานแผ่นกว้างไม่จำกัดสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 10) โดยตรงดังต่อไปนี้

สำหรับกรณีชิ้นงานซึ่งมีขนาดกว้างไม่จำกัด ดังนั้นจากความรู้ทางกลศาสตร์การแตกหัก [1] เราจะได้ค่า  $Y=1.12$  และสำหรับชิ้นงานซึ่งทำจากเหล็กกล้าโลหะหรือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งเป็นเหล็กกล้าชนิด ferritic-pearlitic ค่า  $C$  และ  $m$  ในสมการของ Paris-Erdogan จะมีค่าคงที่ตามสมการที่ 4) เป็น  $C = 6.9 \times 10^{-2} \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$  และ  $m = 3$  ส่วนค่า  $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$  ตามสมการที่ 2) นั้น จะมีค่าเป็นดังนี้  $\sigma_r = 180 - 0 = 180 \text{ N/m}^2$  ทั้งนี้เนื่องจากเราไม่คิดความเค้นกด และเราไม่คิดอิทธิพลของความเค้นเฉลี่ยที่มีต่ออัตราการขยายตัวของรอยร้าวด้วย

ขนาดของรอยร้าวเมื่อชิ้นงานเริ่มขาด  $a_f$  สามารถหาได้จากสมการที่ 11) ดังนี้

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{IC}}{Y\sigma_{max}} \right]^2 = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{100}{1.12 \times 180} \right]^2 = 0.078 \text{ m}$$

แทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ 10) เราจะได้อายุการล้าของชิ้นงานเป็นดังต่อไปนี้

[จาก 10)]

$$N_f = \frac{a_i}{C [Y\sigma_r \sqrt{\pi a_i}]^m} \frac{2}{[m-2]} \left[ 1 - \left( \frac{a_i}{a_f} \right)^{\frac{m}{2}-1} \right] \dots\dots 10)$$

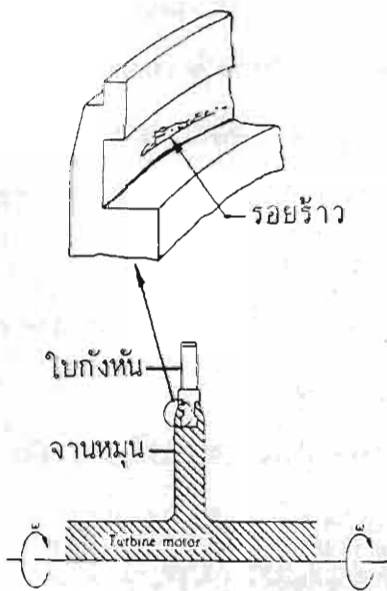
$$Y\sigma_r \sqrt{\pi a_i} = 1.12 \times 180 \times 0.0005 = 7.99$$

$$1 - \left(\frac{a_i}{a_f}\right)^{\frac{m}{2} - 1} = 1 - \left(\frac{0.0005}{0.078}\right)^{\frac{3}{2} - 1} = 0.92$$

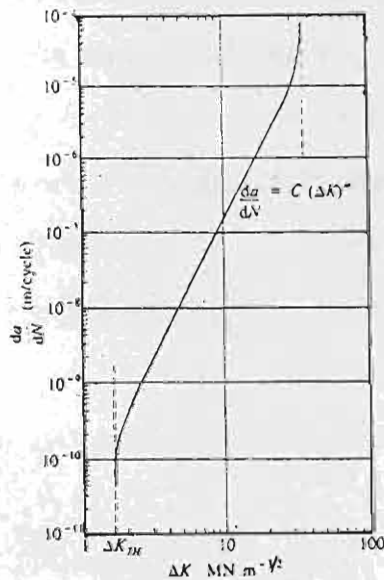
แทนค่าต่าง ๆ ในสมการที่ 10) เราจะได้อายุการล้าของชิ้นงาน  $N_f = 261,396$

cycles

ตัวอย่างที่ 2 สมมติว่าในระหว่างการผลิต และประกอบใบกังหัน เข้ากับจานหมุนซึ่งทำด้วยอลูมิเนียมผสม เกิดรอยขีดข่วนลึก 0.1 mm ที่ผิวของจานหมุนดังในรูป ก) จงคำนวณหาอายุการล้าของจานหมุน ถ้าความเค้นเนื่องจากการหมุนในระนาบของรอยขีดข่วนมีค่าเป็น  $350 \text{ MN/m}^2$   $K_{IC} = 35 \text{ MN}\cdot\text{m}^{3/2}$  และอัตราการขยายตัวของรอยร้าวสำหรับอลูมิเนียมผสม มีค่าดังในรูป ข)



ก)



ข)

วิธีทำ จากรูป ข) เราจะได้ค่าคงที่  $C$  และ  $m$  ในสมการของ Paris-Erdogan เป็นดังนี้

$$C = 4 \times 10^{-11} \quad \text{และ} \quad m = 3.54$$

$$\text{ดังนั้น} \quad da/dN = 4 \times 10^{-11} (\Delta K)^{3.54}$$

รอยร้าววิกฤตก่อนที่งานหมุนจะหัก ( $a_f$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11) โดยสมมติให้บริเวณที่มีรอยร้าว เป็นชิ้นงานแผ่นกว้างไม่จำกัด มีรอยร้าวที่ขอบเล็ก  $a_i = 0.1 \text{ mm}$

[จาก 11)] 
$$a_f = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{IC}}{Y\sigma_{\max}} \right]^2 = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{35}{1.12 \times 350} \right]^2 = 0.0254 \text{ m}$$

เนื่องจากรอยร้าวเริ่มแรก  $a_i = 0.0001 \text{ m}$  ดังนั้นงานหมุนของกังหันจะไม่เกิดการแตกหักแบบเปราะ อย่างทันทีทันใดในระหว่างที่กังหันหมุนใช้งานอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อเปิด/ปิดเครื่องในการใช้งานแต่ละครั้งรอยร้าวจะขยายตัว จนในที่สุดงานหมุนของกังหันจะแตกหัก เมื่อรอยร้าวมีค่าเท่ากับ  $a_f$  อายุการลาของงานหมุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10) ดังนี้ สำหรับตัวอย่างนี้

$$Y\sigma_r \sqrt{\pi a_i} = 1.12 \times 350 \sqrt{\pi \times 0.001} = 6.948$$

$$1 - \left( \frac{a_i}{a_f} \right)^{\frac{m}{2} - 1} = 1 - \left( \frac{0.0001}{0.0254} \right)^{\frac{3.541}{2} - 1} = 0.986$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 10) สำหรับกรณี  $m = 3.54 > 2$  เราจะได้อายุการลา  $N_f = 3351 \text{ cycles}$

ดังนั้นงานหมุนจะเกิดการแตกหักเมื่อเปิด/ปิดกังหันใช้งานไป 3351 ครั้ง เช่น ถ้าเปิด/ปิดกังหันใช้งานวันละ 1 ครั้ง งานหมุนของกังหันจะมีอายุการลาเป็น 9.16 ปี เป็นต้น

## 5. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงวิธีการคำนวณหาอายุการลาของชิ้นงานโดยใช้กลศาสตร์แตกหักสำหรับวัสดุเชิงเส้น ซึ่งชิ้นงานมีรอยร้าวเริ่มแรกอยู่ก่อนแล้ว  $a_i$  นอกจากนี้ในการคำนวณเราต้องทราบค่าต่าง ๆ เช่น ค่าความเข้มข้น  $K_I$  ค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุ  $K_{IC}$  ลักษณะการขยายตัวของรอยร้าวภายใต้การระบับวัฏจักร และขนาดของรอยร้าววิกฤต  $a_f$  ที่ชิ้นงานสามารถทนอยู่ได้ก่อนเกิดการแตกหัก

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. จำลอง ลีมิตรกุล (2526), กลศาสตร์การแตกหักเบื้องต้น, วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 10 ฉบับที่ 3, กรกฎาคม - กันยายน
2. จำลอง ลีมิตรกุล (2531), การออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก, วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 15 ฉบับที่ 2, กรกฎาคม - ธันวาคม
3. Fuchs, H.O. and Stephens, R.I. (1980), Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons Inc, New York, U.S.A. pp 37-39 and pp 82-94.
4. Benham, P.P. and Crawford, R.J. (1987), Mechanics of Engineering Materials, Longman Scientific & Technical and John Wiley & Sons Inc., New York, p 549.
5. Barsom, J.M. (1971), Fatigue-Crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths, Trans. ASME, J. Eng. Ind., Series B, No.4, p 1190.
6. Forman, R.G. et al (1967), Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic - Loaded Structures, Trans. ASME, J. Basic Eng., V 89., No.3, p 459.