

การออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

ดร.จำลอง ลิมตระกูล*

1. บทนำ

การออกแบบเป็นคำที่ใช้ในความหมายต่าง ๆ กันโดยวิศวกรหลายสาขา สำหรับวิศวกรโครงสร้างการออกแบบหมายถึง การสังเคราะห์หรือนำเอาความรู้ในวิชาต่าง ๆ (เช่น สถิติศาสตร์, ความแข็งแรงของวัสดุ, การวิเคราะห์โครงสร้าง, แมทริกซ์, คอมพิวเตอร์ และอื่น ๆ) มาผสมผสานกัน เพื่อสร้างโครงสร้างใหม่ขนาดและรูปร่างพอเหมาะแก่การใช้งาน และเขียนรายละเอียดของโครงสร้างลงในแบบด้วยอัตราส่วนซึ่งเหมาะแก่การสร้างต่อไป เมื่อการออกแบบใช้ในแง่ที่กล่าวถึงข้างต้น การออกแบบเพื่อป้องกันการแตกหักแบบเปราะ หมายความว่า การใช้ความเค้นออกแบบที่พอเหมาะและขณะเดียวกันก็พยายามออกแบบรายละเอียดโครงสร้าง เพื่อขจัดแหล่งที่มีความเค้นหนาแน่นสูง ๆ ซึ่งอาจเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหักได้ ตัวอย่างเช่น รอยเชื่อม, บริเวณที่มีการเปลี่ยนขนาดทันทีทันใด, รู, แฉกชิ้นงานที่ติดกันและอื่น ๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนซึ่งต้องการเชื่อมหรือใช้สลักเกลียวนั้น เราไม่สามารถที่จะออกแบบหรือสร้างโดยปราศจากรอยตำหนิที่กล่าวถึงดังกล่าวได้ ถึงแม้ว่าการออกแบบและสร้างที่ดีสามารถลดขนาดและจำนวนรอยตำหนิต่าง ๆ ลงให้เหลือน้อยที่สุดก็ตาม

สำหรับวิศวกรวัสดุ การออกแบบหมายถึง การเลือกวัสดุและเลือกระดับความเค้นออกแบบให้พอเหมาะที่สภาวะใช้งานต่าง ๆ ซึ่งโครงสร้างจะได้รับ ดังนั้นเมื่อมองในแง่นี้ การออกแบบเพื่อป้องกันการแตกหักแบบเปราะ หมายความว่า การเลือกวัสดุและความเค้นใช้งานหรือความเค้นออกแบบให้เหมาะสมกับภาระที่โครงสร้างจะได้รับ

* รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วิธีการออกแบบที่กล่าวถึงทั้งสองใช้ได้แต่ไม่ควรจะนำไปปนกัน การออกแบบวิธีแรก (และวิธีดั้งเดิมที่นิยมใช้กัน) สมมติว่านักออกแบบเริ่มต้นโดยมีวัสดุและระดับความเค้นออกแบบ ซึ่งระบุหรือกำหนดโดยโคต (หรือมาตรฐาน) การออกแบบต่าง ๆ นักออกแบบต้องออกแบบรูปร่างและขนาดของโครงสร้างให้สามารถรับภาระที่มากระทำสูงสุดได้ โดยความเค้นสูงสุดในโครงสร้างมีค่าไม่เกินความเค้นที่ออกแบบใช้งาน σ_a สำหรับชิ้นส่วนที่รับแรงดึง σ_a จะเป็น ส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความเค้นคราก σ_{ys} และสำหรับชิ้นส่วนที่รับแรงกด σ_a จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความเค้นโก่งงอ เป็นต้น ระดับความเค้นออกแบบที่ยอมรับให้ดังกล่าวนี้สมมติว่าการสร้างเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ โครงสร้างไม่มีรอยตำหนิ, รอยร้าว หรือความไม่ต่อเนื่อง ในวัสดุที่มีลักษณะเหมือนรอยร้าวต่าง ๆ ในความเป็นจริงความเค้นหนาแน่นเนื่องจากรอยตำหนิ หรือความไม่ต่อเนื่องต่าง ๆ อาจจะมีอยู่ แต่นักออกแบบสมมติว่าวัสดุเกิดการครากขึ้นในบริเวณใด ๆ รอยตำหนิดังกล่าว และการกระจายของความเค้นจะจัดรูปใหม่บริเวณที่มีความเค้นหนาแน่น

การออกแบบวิธีที่สองหมายถึง การเลือกวัสดุและระดับความเค้นที่ยอมรับให้เกิดขึ้น โดยพิจารณาถึงหลักความจริงที่ว่า ความไม่ต่อเนื่องหรือรอยตำหนิในโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนอาจจะมียู่หรืออาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากภาวะแนวรั้วจักร หรือเนื่องจากภาวะและสภาวะที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและรอยร้าวเนื่องจากความเค้น (Stress-corrosion Cracking) ซึ่งจำเป็นต้องระบุค่าความเหนียวของวัสดุในระดับที่เหมาะสม การออกแบบในทัศนะที่กล่าวถึงนี้ได้เป็นที่รู้จักใช้กันในชื่อของกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture Mechanics)

เพื่อให้โครงสร้างปลอดภัยและมีความต้านทานการแตกหัก เราควรใช้วิธีการออกแบบทั้งสองที่กล่าวถึงนักออกแบบต้องออกแบบรูปร่างและขนาดของโครงสร้างเพื่อป้องกันหรือต้านทานการฉีก เนื่องจากแรงดึงเกินขนาดหรือแรงกดเกินค่าแรงกดวิกฤต และป้องกันการขยายตัวของรอยร้าวเนื่องจากการแตกหักแบบเปราะ การฉีกเนื่องจากการครากของวัสดุหรือการโก่งตัวของโครงสร้างเป็นหลักในการออกแบบที่นิยมใช้กันในอดีตในรูปแบบของทฤษฎีการฉีกและการ

การวิเคราะห์การโก่งตัวของคานตามทฤษฎีของออยเลอร์ ผลของการพัฒนาการก่อสร้างการแตกหักในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้เราสามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานการแตกหักแบบเปราะและต้านทานการขยายตัวของรอยร้าวที่มีอยู่ในโครงสร้างต่าง ๆ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก ซึ่งเป็นการออกแบบโดยใช้หลักปลอดภัยจากการวิบัติ (fail-safe) หรือปลอดภัยตลอดอายุ (safe-life) หลักการออกแบบทั้งสองสมมติว่าโครงสร้างที่ออกแบบมีรอยร้าวหรือรอยตำหนิเกิดขึ้นอยู่แล้ว หรือรอยร้าวอาจจะเริ่มเกิดขึ้นและขยายตัวตลอดอายุการใช้งานของชิ้นงานหนึ่ง ๆ ดังนั้นนักออกแบบจึงควรจะรวมเอาหลักการออกแบบของกลศาสตร์การแตกหัก (ซึ่งพิจารณาว่าชิ้นงานอาจมีรอยร้าวได้) รวมเข้ากับหลักการออกแบบเดิมต่าง ๆ เช่น ค่าความปลอดภัยและทฤษฎีการวิบัติต่าง ๆ จึงจะทำให้ชิ้นงานที่ออกแบบขึ้นมาใช้งานได้อย่างปลอดภัย ตามสภาวะการใช้งานที่ต้องการ [1]

2. วิธีการออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

จากทฤษฎีของกลศาสตร์การแตกหักที่กล่าวถึงมาแล้วในบทความก่อน [2] ค่าความเค้นเข้มข้นวิกฤตของวัสดุใด ๆ ที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับความเค้นที่มากระทำและขนาดของรอยร้าวตามสมการ

$$K_{IC} = c\sigma\sqrt{a_c} \quad \dots\dots 1)$$

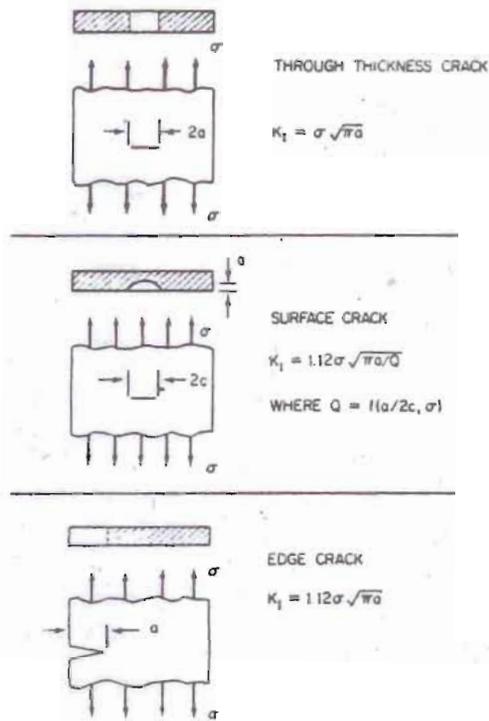
- โดยที่ K_{IC} = ค่าความเค้นเข้มข้นวิกฤตหรือค่าความต้านทานการแตกหักซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุ มีหน่วยเป็น $\text{psi}\sqrt{\text{in}}$ หรือ $\frac{\text{MN}}{\sqrt{\text{m}}}$
 c = ค่าคงที่ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับรูปร่างและชนิดของรอยร้าว [1, 2]
 σ = ความเค้นที่มากระทำกับชิ้นงานหรือความเค้นระบุ
 a_c = ขนาดวิกฤตของรอยร้าว

ขั้นตอนที่ใช้วิเคราะห์ความปลอดภัยของโครงสร้างจากการวิบัติ เนื่องจากการแตกหักแบบเปราะมีดังนี้คือ

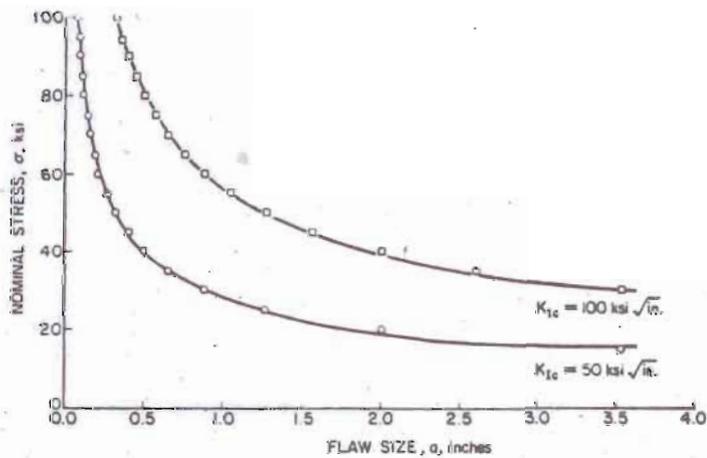
- ก) หาค่า K_{IC} และ σ_{ys} ที่อุณหภูมิใช้งานสำหรับวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง
- ข) เลือกชนิดของรอยร้าวที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างพร้อมกับสมการค่าความเค้น-เค้น K_I
- ค) หาคความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและขนาดของรอยร้าวที่ความเค้นออกแบบค่าต่าง ๆ จากสมการ K_I ที่เลือกในข้อ ข) และ K_{IC} ที่ได้จากข้อ ก)

รูปที่ 1) แสดงชนิดของรอยร้าว 3 แบบที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างบอยที่สุดพร้อมด้วยสมการของ K_I แต่ขาดองการสมการ K_I สำหรับรอยร้าวที่ซับซ้อนขึ้นก็ต้องเลือกใช้จากเอกสารอ้างอิงต่าง ๆ [1, 2]

เพื่อเป็นตัวอย่างการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง σ_a และ K_I พิจารณาจากโครงสร้างซึ่งมีรอยร้าวทะลุตลอดความหนา เช่นดังในรูปที่ 1 ก) วัสดุที่ใช้มีค่า $\sigma_{ys} = 100$ ksi และ $K_{IC} = 50 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ แทนค่า $K_I = K_{IC} = 50$ และ $\sigma = \sigma_{ys} = 100$ ลงในสมการ $K_I = \sigma\sqrt{a}$ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นออกแบบ σ_d และขนาดของรอยร้าววิกฤต a_c ดังในรูปที่ 2) เช่นถ้า $\sigma_d = 30$ ksi ดังนั้นขนาดของรอยร้าววิกฤตที่โครงสร้างสามารถทนได้คือ $a_c = 0.88 \text{ in}$ แต่ค่าความปลอดภัยต่อการแตกหักแบบเปราะเท่ากับ 2 ขนาดของ a_c จะมีค่าเพียง 0.22 in เท่านั้น เช่นดังรูปที่ 2) ถ้าเราเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานการแตกหักสูงกว่าเดิม เช่น ถ้าใช้วัสดุที่มีค่า $K_{IC} = 100 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ ขนาดของรอยร้าววิกฤต a_c จะมีค่าเท่ากับ 3.75 in เช่นดังในรูปที่ 2) เป็นต้น



รูปที่ 1 ค่า K_I สำหรับรอยร้าวแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2 กราฟ σ - a กรณีรอยร้าวทะลุตลอดความหนา

3. การเลือกวัสดุใช้ในการออกแบบ

วิธีการออกแบบชิ้นงานหรือโครงสร้างขนาดใหญ่ นั้น วิศวกรจะต้องออกแบบให้ชิ้นงานสามารถทนการครากชั้นในบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่นสูงสุดได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือบวมขึ้น แต่เนื่องจากการครากของวัสดุจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ชิ้นงานมีขนาดไม่ต่อเนื่องหรือมีรอยตำหนิเช่น รอยร้าว ดังนั้นขนาดรอยร้าวเล็กที่สุดหรือขนาดวิกฤตของรอยร้าว a_c จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $(K_{IC}/\sigma_{ys})^2$

อัตราส่วน K_{IC}/σ_{ys} เป็นดัชนีซึ่งใช้เปรียบเทียบค่าความเหนียวของวัสดุต่าง ๆ ในการใช้งานเราต้องเลือกให้รอยร้าวมีขนาดใหญ่พอที่จะตรวจพบได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินไปจนชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่า K_{IC}/σ_{ys} สูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งในทางปฏิบัติเราจะต้องพิจารณาถึงตัวแปรอื่น ๆ ประกอบอีกหลายอย่างเช่น ชนิดของโครงสร้าง อายุการใช้งาน คุณภาพการประกอบ/ผลิต ราคา ความถี่ของการตรวจสอบและอื่น ๆ สรุปแล้วการใช้กลศาสตร์การแตกหักจะทำให้เราสามารถเลือกพิจารณาตัวแปรที่กล่าวถึงข้างต้นได้อย่างมีหลักเกณฑ์

หลักพื้นฐานที่สำคัญของกลศาสตร์การแตกหักก็คือ สมมติให้ชิ้นงานมีรอยร้าวขนาดเล็ก ๆ อยู่แล้ว ชิ้นงานจะเกิดครากตัวขึ้นได้ในบริเวณที่มีรอยร้าวดังกล่าว ถ้าภาระที่กระทำกับชิ้นงานมีค่าสูงพอ และถ้าชิ้นงานหนาพอเหมาะ สภาวะความเครียดจะเกิดขึ้นได้ในบริเวณดังกล่าวเราสามารถใช้อัตราส่วน K_{IC}/σ_{ys} ของวัสดุเป็นดัชนีสำหรับกำหนดค่าความปลอดภัยของชิ้นงานจากการแตกหักแบบเปราะได้

เพื่อเป็นตัวอย่างการใช้ค่าดัชนี K_{IC}/σ_{ys} สำหรับเป็นตัวแปรในการเลือกวัสดุพิจารณาชิ้นงานแผ่นกว้างมีรอยร้าวยาว $2a$ ทะลุตลอดความหนาตั้งในรูปที่ 1 ก) ชิ้นงานอยู่ภายใต้ภาระในแนวแกนมีค่าความเค้นเฉลี่ย σ เราต้องการจะเลือกใช้วัสดุซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าที่มีค่า σ_{ys} ต่าง ๆ กัน ดังในตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ขนาดของรอยร้าววิกฤต ($2a_c$) ที่เป็นฟังก์ชันของค่า σ_{ys} และ K_{IC}

σ_{ys} (ksi)	Assumed K_{IC} Values (ksi $\sqrt{in.}$)	Critical Flaw Size, $2a$ (in.) (actual design stress level, ksi, is shown in parenthesis)			
		$\sigma_d = 100\% \sigma_{ys}$	$\sigma_d = 75\% \sigma_{ys}$	$\sigma_d = 50\% \sigma_{ys}$	$\sigma_d = 25\% \sigma_{ys}$
260	80	0.06(260)	0.11(195)	0.24(130)	0.96(65)
220	110	0.16(220)	0.28(165)	0.64(110)	2.55(55)
180	140	0.39(180)	0.68(135)	1.54(90)	6.16(45)
180	220	0.95(180)	1.69(135)	3.80(90)	15.22(45)
140	260	2.20(140)	3.90(105)	8.78(70)	35.13(35)
110	170	1.52(110)	2.70(82.5)	6.08(55)	24.33(27.5)
80	200	3.98(80)	7.07(60)	15.92(40)	63.66(20)
40	100	3.98(40)	7.07(30)	15.92(20)	63.66(10)

จากตารางที่ 1) จะเห็นได้ชัดว่าค่า K_{IC} ของเหล็กกล้าจะอยู่ระหว่าง 80 ถึง 260 ksi \sqrt{in} ขนาดของรอยร้าววิกฤต $2a_c$ ที่ความเค้นออกแบบ 4 ระดับคือ $100\% \sigma_{ys}$, $75\% \sigma_{ys}$, $50\% \sigma_{ys}$ และ $25\% \sigma_{ys}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2) ดังนั้น จากรูปที่ 1 ก) เราจะได้อาคความต้านทานการแตกหักมีค่าเป็น

$$K_{IC} = \sigma_d \sqrt{\pi a_c} \quad \text{หรือ} \quad a_c = \frac{1}{\pi} [K_{IC} / \sigma_d]^2$$

$$\therefore \text{ขนาดของรอยร้าววิกฤต } 2a_c = \frac{2}{\pi} [K_{IC} / \sigma_d]^2 \quad \dots\dots 2)$$

ตารางที่ 1) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของ σ_{ys} , K_{IC} และ σ_d ที่มีต่อขนาดรอยร้าววิกฤตในงานแผ่นกว้างซึ่งมีรอยร้าวทะลุตลอดความหนา ตัวอย่างเช่นสำหรับเหล็กกล้าที่มีค่า $\sigma_{ys} = 260$ ksi และความเค้นออกแบบ $\sigma_d = 0.5 \sigma_{ys} = 130$ ksi ขนาดรอยร้าววิกฤต

$2a_c = 0.24 \text{ in}$ ถ้า σ_d สำหรับชิ้นงานหนึ่งเป็น 130 ksi จริง เราจะเห็นได้ชัดว่าควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่า σ_{ys} ให้ต่ำลงกว่าเดิม และค่า K_{IC} ให้สูงกว่าเดิม เช่น เหล็กกล้าที่มีค่า $\sigma_{ys} = 180 \text{ ksi}$ ซึ่งถ้า $\sigma_d = 0.75 \sigma_{ys} = 135 \text{ ksi}$ ขนาดของรอยร้าววิกฤตจะเป็น 0.68 in (สำหรับกรณี $K_{IC} = 140$) หรือ 1.69 in (สำหรับกรณี $K_{IC} = 220$) ซึ่งจะมากกว่า 0.24 in แนววัสดุที่เหนียวกว่าและมีค่า K_{IC} สูงกว่าจะมีราคาแพงขึ้นด้วยเสมอ ในทางปฏิบัติเราก็ต้องเลือกวัสดุใช้ในการออกแบบ ให้มีค่าความต้านทานการแตกหัก (ค่า K_{IC}) หรือมีความเหนียวพอเหมาะและมีราคาพอสมควร

ข้อสังเกต

ก) ข้อพึงสังเกตจากตารางที่ 1) อย่างหนึ่งก็คือการเลือกใช้ค่าความเค้นออกแบบที่ค่าความปลอดภัย (หรือเปอร์เซ็นต์ของ σ_{ys}) ต่าง ๆ จะไม่ให้ค่าความปลอดภัยและระดับความเชื่อมั่นต่อการแตกหักเท่ากัน เช่น สมมติว่าเหล็กกล้าที่ใช้สองชนิดมีค่า σ_{ys} เป็น 220 ksi และ 110 ksi ถ้าความเค้นออกแบบ $\sigma_d = 0.5 \sigma_{ys}$ ดังนั้น σ_d จะมีค่าเท่ากับ 110 ksi และ 55 ksi ตามลำดับ ขนาดรอยร้าววิกฤตจะเป็น 0.64 in (สำหรับ $\sigma_{ys} = 220 \text{ ksi}$) และ 6.08 in (สำหรับ $\sigma_{ys} = 110 \text{ ksi}$) ถ้า σ_d ของวัสดุที่มีค่าต่ำเพิ่มเป็น 100% ของ σ_{ys} ดังนั้น ขนาดรอยร้าววิกฤต $2a_c = 1.52 \text{ in}$ ซึ่งก็ยังสูงกว่า 0.64 ถึงประมาณ 2.5 เท่า

ข) สำหรับวัสดุที่มีค่า σ_{ys} ต่ำ จากตารางที่ 1) จะเห็นว่า K_{IC}/σ_{ys} มีค่าสูง และรอยร้าววิกฤต $2a_c$ จะมีค่าสูงมาก แสดงว่าทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักจะใช้ไม่ได้ ซึ่งเราสามารถเทียบได้กับกรณีของเสาว่า ถ้าอัตราส่วนความขลุ่ยหรือความเพียว (L/r) มีค่าต่ำมาก ค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสูตรของออยเลอร์จะมีค่าสูงกว่า σ_{ys} ดังนั้นเราจึงใช้สูตรของออยเลอร์ในกรณี L/r มีค่าต่ำมากไม่ได้

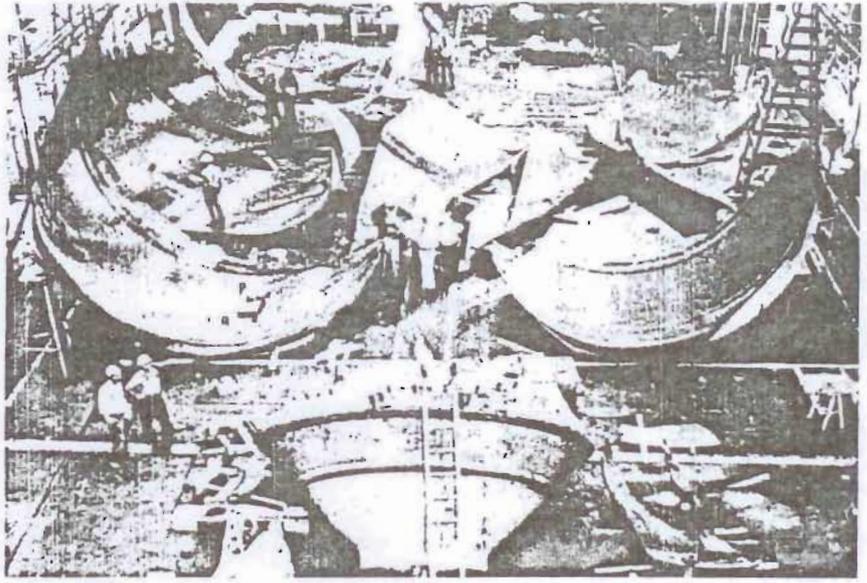
โดยสรุปแล้วในบางกรณีนักออกแบบควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่า σ_{ys} ต่ำและใช้ค่า σ_d สูงจะทำให้ช่วยเพิ่มความปลอดภัยและระดับความเชื่อมั่นต่อการแตกหักได้ และพึงระลึกเสมอว่าการออกแบบที่ต้นนี้ วิศวกรไม่ควรออกแบบให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายทุกประการรวมทั้งการแตกหักด้วย

4. การวิเคราะห์ชิ้นงานที่เกิดการวิบัติ

เพื่อเป็นตัวอย่างการเลือกวัสดุใช้ในการออกแบบ ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีศึกษา 2 กรณี ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าวิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาถึงการครากและการแตกหัก (เนื่องจากรอยตำหนิหรือรอยร้าว) ในการออกแบบโครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอยู่เสมอจะสามารถออกแบบชิ้นงานเพื่อป้องกันการวิบัติได้

4.1 การ วิบัติของโรจจรวดในขณะทำการอัดทดสอบด้วยน้ำ [1]

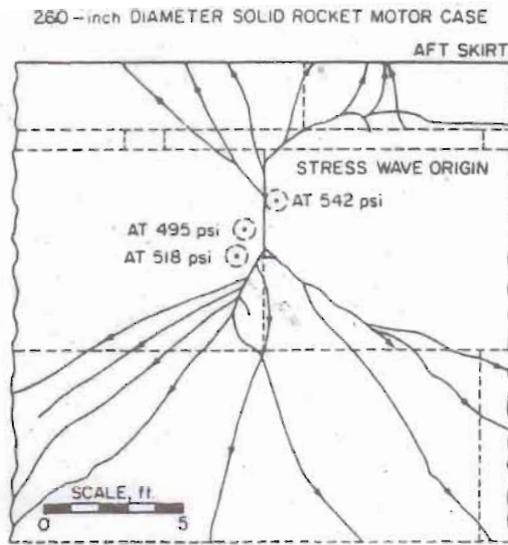
โรจจรวด (Rocket motor) ทำจากแผ่นเหล็กชนิด maraging เบอร์ 250 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 260 in สูง 65 ft ทน 0.73 in ค่าความเค้นคราก $\sigma_{ys} = 240$ ksi ความดันออกแบบ $p_d = 690$ psi ในขณะทำการอัดทดสอบด้วยน้ำตัวโรจจรวดเกิดการแตกเมื่ออัดถึงความดันเพียง 542 psi ความเค้นในผนังขณะที่เกิดการวิบัติมีค่า 100 ksi ซึ่งต่ำกว่า σ_{ys} ถึง 2.4 เท่าการแตกหักของโรจจรวดมีลักษณะดังในรูปที่ 3)



รูปที่ 3 ลักษณะของโครงสร้างตลิ่งหลังจากการแตกหักในขณะทำการอัดทดสอบด้วยน้ำ [1]

คณะกรรมการตรวจสอบการเสียหายซึ่งประกอบด้วยผู้แทนจากฝ่ายอุตสาหกรรมและฝ่ายรัฐบาลของสหรัฐได้สรุปผลความเสียหายไว้ดังนี้คือ

ก) การแตกหักของโครงสร้างตลิ่งทั้งที่เกิดจากรอยร้าวและที่เป็นแบบเปราะ ซึ่งรอยร้าวขยายตัวออกด้วยความเร็วถึง 500 ft/s ผลจากการตรวจสอบชิ้นงานที่แตกหัก พบว่าการแตกหักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีรอยตำหนิ 2 แห่ง ซึ่งอาจจะเกิดจากการเชื่อมด้วยมือระหว่างการตบแต่งรอยเชื่อม หลังจากเกิดรอยร้าวแล้วการแตกหัก ได้แยกตัวออกเป็น 2 ทาง (ดังในรูปที่ 3) และทำให้ตัวโครงสร้างตลิ่งเกิดการแตกหักในที่สุด



รูปที่ 4 แนวทางของรอยร้าวที่ขยายตัวออกจากจุดเริ่มแรกเส้นประคือแนวเชื่อม [1]

ข) บทเรียนที่ได้จากการเสียหายในครั้งก็คือ "การขาดความรู้ในการเลือกวัสดุใช้ในการออกแบบ" เริ่มจากเลือกใช้เหล็ก maraging เบอร์ 250 ซึ่งมีค่าความเค้นคราก $\sigma_{ys} = 240 \text{ ksi}$ ทำเป็นโครงจรวดโดยใช้ความหนา 0.73 in ขณะใช้งานวัสดุจะอยู่ภายใต้ความเค้นกระหนาบ ซึ่งเป็นการเลือกที่ไม่เหมาะสมนักเพราะค่า K_{IC} ของวัสดุเท่ากับ $79.6 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ เมื่อเลือกใช้ความเค้นออกแบบ $\sigma_d = 160 \text{ ksi}$ (ค่าความปลอดภัย = $240/160 = 1.5$) รอยร้าวที่ผิวลึกเพียง 0.08 in ก็จะสามารถทำให้เกิดการวิบัติได้ แต่ผู้ผลิตคิดว่าสามารถตรวจรอยตำหนิตั้งกล่าวพบได้ ซึ่งเป็นการตัดสินใจที่ไม่เหมาะสม ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อทำการเชื่อมโครงจรวด ค่า K_{IC} ของวัสดุจะลดลงไปอยู่ระหว่าง 39.4 ถึง $78 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรอยตำหนิในแนวเชื่อม

ค) ผลการวิเคราะห์หลังการวิบัติของโครงจรวดโดยใช้รอยตำหนิกับแนวเชื่อมทิศทางต่างๆ พบว่าค่า K_{IC} อยู่ระหว่าง 38.8 ถึง $83.1 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $55 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ ซึ่งจะเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์การวิบัติต่อไป ผลการตรวจสอบรอยแตกหักสรุป

ได้ว่า รอยตำหนิที่เป็นต้นเหตุของการวิบัติมีรูปร่างเป็นลักษณะกล้วย ซึ่งสามารถประมาณได้ด้วยรูปวงรียาว 1.4 in ลึก 0.22 in ขนาดที่สำคัญคือรอยตำหนิลึก 0.22 in ซึ่งรอยร้าวอาจจะเริ่มขยายตัวจนทะลุความหนาได้เป็นครั้งแรก ขนาดรอยร้าววิกฤตสามารถหาได้จากหลักของกลศาสตร์ของการแตกหักในกรณีที่มีรอยตำหนิเป็นรูปวงรีภายในดังนี้

$$K_I = \sigma \sqrt{a} f \left(\frac{a}{c} \right) \quad \dots 3)$$

โดยที่ a = ครึ่งหนึ่งของความลึกของรอยร้าว

c = ครึ่งหนึ่งของความยาวของรอยร้าว และ

f = เป็นแฟกเตอร์ของรูปของทรงรี [1]

อย่างไรก็ดีเมื่อ $a/c \rightarrow 0$ ค่า $f(a/c) \rightarrow \sqrt{\pi}$ ดังนั้นสมการที่ 3) จะมีรูปเป็น

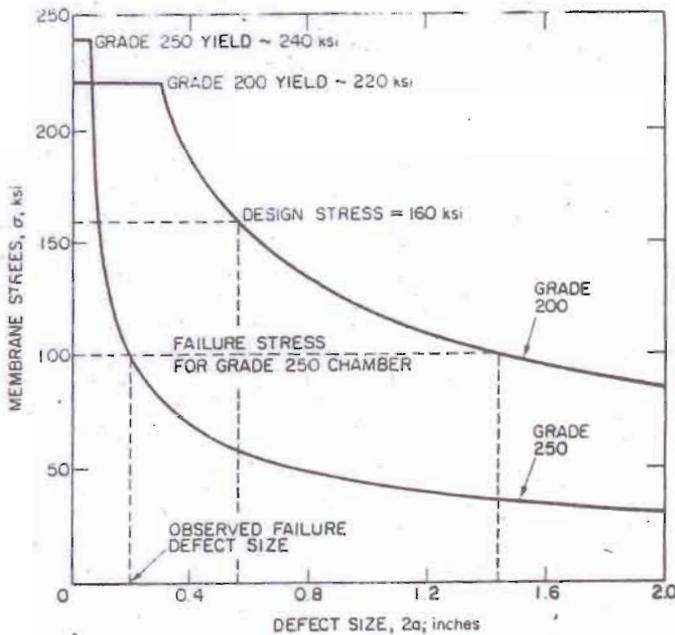
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots 4)$$

สำหรับลักษณะของรอยร้าวที่พิจารณา ผลต่างจากสมการที่ 3) และ 4) มีเพียง 4% เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สะดวกจะใช้สมการที่ 4) ในการวิเคราะห์ แทนค่า $K_{IC} = 55 \text{ ksi } \sqrt{\text{in}}$ แล้ววาดกราฟความเค้นในผนังและขนาดของรอยร้าววิกฤต (ดังในรูปที่ 5) สำหรับเหล็กเบอร์ 200 และ 250 เพื่อเปรียบเทียบกัน จากกราฟของเหล็กเบอร์ 250 เราพบว่าที่ค่าความเค้นวิกฤต 100 ksi ขนาดรอยร้าววิกฤต $2a_C = 0.20 \text{ in}$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ สำหรับกราฟของเหล็กเบอร์ 200 ในรูปที่ 5) นั้นสร้างจากค่า $K_{IC} = 150 \text{ ksi } \sqrt{\text{in}}$ ซึ่งมากกว่าของเหล็กเบอร์ 250 เกือบ 2 เท่า จากกราฟพบว่าที่ความเค้น 100 ksi รอยร้าววิกฤตขนาดลึกถึง 1.42 in รอยร้าวจึงจะขยายตัวแต่ไม่เป็นจริงเนื่องจากชิ้นงานหนาเพียง 0.73 in เท่านั้น ถึงแม้ว่าความเค้นจะเท่ากับความเค้นออกแบบคือ 160 ksi ขนาดความลึกวิกฤตของรอยร้าวจะเป็น 0.56 in ชิ้นงานก็จะเกิดการแตกหักแบบความเครียดระนาบได้ อย่างไรก็ดี

เมื่อรอยร้าวขนาดใหญ่ดังกล่าวขยายจนทะลุความหนา ก็จะถูกยับยั้งโดยสภาวะความเค้นระนาบทันที

ง) ผลจากการตรวจสอบความเสียหายของโครงจรวดข้างต้น ชี้ให้เห็นได้ว่าเหล็ก maraging เบอร์ 200 มีความเหมาะสมสำหรับใช้ทำโครงจรวด มากกว่าเหล็ก maraging เบอร์ 250 ผลสรุปข้อนี้ได้มีการพิสูจน์ในการแข่งขันการทำโครงจรวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 260 in ให้ NASA ซึ่งผู้แข่งขันที่ใช้เหล็ก maraging เบอร์ 200 ทำโครงจรวดประสบความสำเร็จทั้งในขณะอัดทดสอบด้วยน้ำและยิงทดสอบใช้งานจริงด้วยแรงขับมากกว่า 6×10^6 lb

โดยสรุปแล้วการใช้เหล็กกล้าซึ่งมีค่าความเค้นครากต่ำ แต่มีค่าความเหนียวสูง (อัตราส่วน K_{IC}/σ_{ys} สูง) เช่นดังในกรณีศึกษาของโครงจรวดจะให้ผลดีกว่า ถึงแม้ว่าค่าความเค้นออกแบบที่ใช้จะมีค่าใกล้เคียงความเค้นครากมากกว่าก็ตาม



รูปที่ 5 กราฟออกแบบสำหรับหาขนาดรอยตำหนิวิกฤต
ในโครงจรวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 260 in

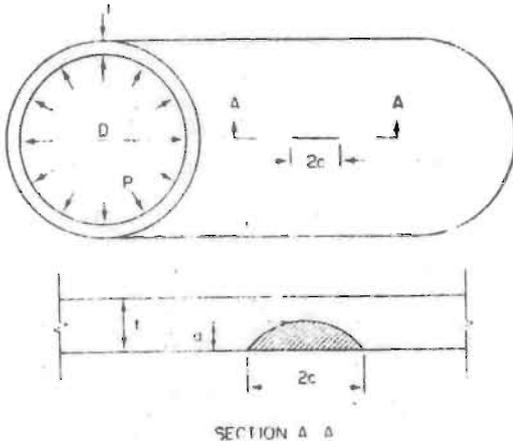
4.2 การ วิบัติของส่วนที่ยึดปีกเครื่องบิน F-111 [1]

ตัวอย่างซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกใช้ค่า K_{IC} หรือค่าความต้านทานการแตกหักให้เหมาะสม อีกตัวอย่างหนึ่งก็คือ กรณีศึกษาเรื่องการแตกหักของส่วนที่ยึดปีกเครื่องบิน F-111 ซึ่งทำด้วยเหล็กกล้า D6-AC ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อเพิ่มค่า σ_{ut} ให้สูงตามต้องการ ทั้งนี้ก็เพื่อจะทำให้ความเค้นออกแบบ $\sigma_d = \frac{2}{3} \sigma_{ut}$ สำหรับน้ำหนักลง อย่างไรก็ตามผลของการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะทำให้ค่า K_{IC} ลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความปลอดภัยลดลงด้วย ผลที่เกิดขึ้นก็คือการ วิบัติของส่วนที่ยึดปีกเครื่องบิน ทางแก้มก็คือ เราควรเลือกกรรมวิธีทางความร้อนที่ทำให้ค่า K_{IC} ของเหล็กกล้า D6-AC สูงขึ้น แม้ว่าค่า σ_{ut} จะต่ำกว่าเดิม และเลือกใช้ค่า $\sigma_d > \frac{2}{3} \sigma_{ut}$ เพื่อให้ค่าความเค้นออกแบบเท่าเดิม แต่ขนาดรอยร้าวที่ขึ้นงานทนได้มีค่าเพิ่มขึ้น

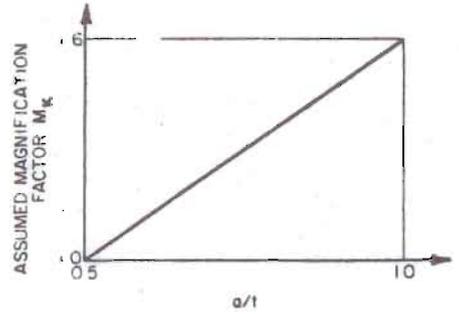
ตัวอย่างกรณีศึกษาเรื่องการ วิบัติของโครงจรวดและส่วนยึดปีกเครื่องบินที่กล่าวถึงข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าวิศวกรที่ออกแบบชิ้นส่วน เครื่องจักรกลหรือ โครงสร้าง ควรพิจารณาถึงการครากและการแตกหักของวัสดุเป็นหลักพร้อม ๆ กันเสมอ

5. การออกแบบภาชนะความดันโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

เพื่อเป็นตัวอย่างการใช้กลศาสตร์การแตกหักช่วยเลือกวัสดุในการออกแบบชิ้นต้นในที่นี้จะขอยกตัวอย่างการเลือกใช้วัสดุสำหรับภาชนะความดันดังในรูปที่ 6) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าที่มีค่าความเค้นครากสูง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระบุ 30 in ผนังหนาอย่างน้อย 0.5 in ความดันภายใน 5000 psi (34.5 MPa หรือ 345 บรรยากาศ) นักออกแบบสามารถเลือกใช้เหล็กกล้าได้จากตารางที่ 2) ซึ่งเป็นค่าสมมติ อย่างไรก็ตามก็ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงนอกจากความคงทนต่อการใช้งานก็คือราคาและน้ำหนักของภาชนะความดันอีกด้วย



รูปที่ 6 หน้าที่ของภาชนะความดัน แสดงรอยร้าวที่ผิว



รูปที่ 7 ค่า M_K สำหรับรอยร้าวลึก ๆ

ตารางที่ 2 ค่าความเค้นครากและค่าความต้านทานการแตกหักของเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเหล็กกล้า	ความเค้นคราก σ_{ys} (ksi)	ความต้านทานการแตกหัก K_{IC} (ksi $\sqrt{\text{in}}$)
A	260	80
B	220	110
C	180	140
D	180	220
E	140	260
F	110	170

ก่อนอื่นนักออกแบบต้องประมาณขนาดของรอยร้าวหรือรอยตำหนิสูงสุดในภาชนะ-
 ความดันโดยพิจารณาถึงการผลิตและการประกอบเป็นหลัก ในที่นี้สมมติว่าเราต้องการป้องกันการ
 การเสียหายที่จะเกิดจากรอยร้าวที่ผิวลึก 0.5 in ซึ่งมีอัตราส่วน $\frac{a}{2c} = 0.25$ ดังแสดง
 ในรูปที่ 6) ขนาดที่สมมติขึ้นอาจจะเกิดจากการประกอบไม่ดีหรือการขยายตัวของรอยร้าว
 เนื่องจากการล้าหรือความเค้นที่เกิดเนื่องจากการกัดกร่อน (ขั้นตอนนี้ควรพิจารณาอย่างรอบ-
 คอบเพราะเป็นขั้นแรก ถ้าสมมติผิดพลาดไปก็จะเกิดการเสียหายได้ บ่อยครั้งที่เดียวที่นักออกแบบ
 หลายคนมองข้ามหรือไม่ถึงขั้นตอนนี้ โดยสมมติว่าจะมีการตรวจหารอยร้าวหรือรอยตำหนิ
 พบและแก้ไขได้หมด)

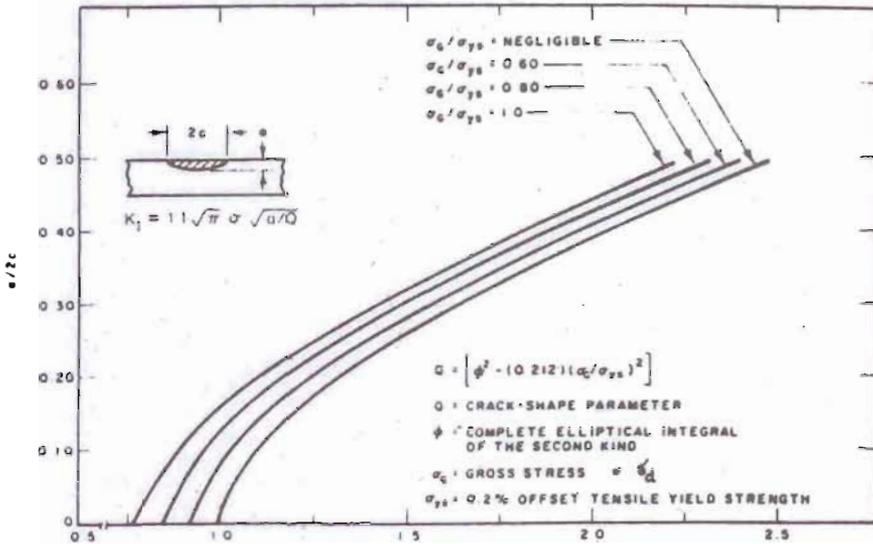
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{IC} และ a สำหรับรอยร้าวที่ผิวมีรูปเป็น [1]

$$K_{IC} = 1.1\sqrt{\pi} M_K \sigma \sqrt{a/Q} \quad \dots\dots 5)$$

โดยที่ M_K = แฟกเตอร์สำหรับรอยร้าวลึกๆ ซึ่งสมมติให้มีค่าเปลี่ยนอย่างเชิงเส้นดังในรูปที่ 7)
 จาก 1.0 ถึง 1.6 เมื่อค่า a/t เปลี่ยนจาก 0.5 ถึง 1.0 และที่ค่า
 $\frac{a}{t} < 0.5, M_K \approx 1.0$

Q = ตัวแปรสำหรับรูปร่างของรอยร้าวที่ผิวดังในรูปที่ 8)

$\sigma = pD/(2t)$ = ความเค้นที่กระทำกับผนังภาชนะความดันสูงสุด



รูปที่ 8 ตัวแปรสำหรับรูปร่างของรอยร้าวที่ผิว, Q

เป็นดังนี้

จากรูปสมการที่ 5) ใหม่เราจะได้อาคความเค้นออกแบ σ_d และความหนา t

$$\sigma_d = \frac{\sqrt{Q} K_{Ic}}{1.1\sqrt{\pi} M_K \sqrt{a}} \quad \dots\dots 6)$$

$$t = \frac{pD}{2\sigma_d} \quad \dots\dots 7)$$

ค่าความหนา t และความเค้นออกแบ σ_d สำหรับเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ตามตารางที่ 3) สามารถคำนวณหาได้โดยใช้วิธีคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

- ก) สมมติค่า σ_d/σ_{ys} แล้วหาค่า Q จากรูปที่ 8)
- ข) สมมติค่า t แล้วหาค่า M_K จากรูปที่ 7)

- ค) คำนวณหาค่า σ_d ตามสมการที่ 8) ถ้า $\sigma_d > \sigma_{ys}$ ให้ใช้ค่า $\sigma_d = \sigma_{ys}$ สำหรับการคำนวณขั้นต่อไป
- ง) คำนวณหาค่าความหนา t จากสมการที่ 7)
- จ) ตรวจสอบค่าความหนา t ว่าเท่ากับค่าที่สมมติหรือไม่ ถ้าไม่เท่าก็ให้กลับไปเริ่มต้นที่ขั้น ก) ใหม่ ถ้าค่า t เท่ากับที่สมมติก็เป็นอันหยุดการคำนวณได้
- ค่าความหนาสำหรับเหล็กกล้าชนิดต่าง ๆ ที่คำนวณได้ตามวิธีที่กล่าวถึงแสดงไว้ในตารางที่ 3) ข้างล่าง

ตารางที่ 3 ค่าความหนาของผนังที่คำนวณได้จากกรณีที่มีรอยร้าวเริ่มขยายตัว (ให้ $K_T = K_{IC}$)

Steel	Yield Strength, σ_{ys} (ksi)	Assumed K_{IC} Values (ksi $\sqrt{\text{in.}}$)	Design Stress, σ_d (ksi)	$\frac{\sigma_d}{\sigma_{ys}}$	M_k	Q	Wall Thickness, t (in.)
A	260	80	70	0.27	1.0	1.45	1.07
B	220	110	86	0.40	1.1	1.43	0.87
C	180	140	100	0.56	1.2	1.42	0.75
D	180	220	124	0.72	1.43	1.36	0.60
E	140	250	140	1.0	1.51	1.25	0.54
F	110	170	109	0.99	1.26	1.25	0.69

จากตารางที่ 3) เราจะเห็นได้ชัดว่าภาชนะความดันที่ทำจากเหล็กกล้าชนิด E ซึ่งมีค่าความเค้นดึงครากต่ำแต่มีค่าความต้านทานการแตกหักสูงจะมีผนังบางที่สุด และน้ำหนักน้อยที่สุด เพื่อเป็นการแสดงว่าการใช้เหล็กกล้าที่มีค่าความเค้นดึงสูงจะไม่ให้น้ำหนักน้อยที่สุดหรือประหยัดที่สุด ในขั้นนี้จะขอยกตัวอย่างจากกรณีที่แล้วมาพิจารณา โดยเริ่มสมมติราคาเหล็กกล้าต่อความยาว 1 ft ขึ้นมาแล้วคำนวณหาค่าน้ำหนักและราคาต่อความยาว 1 ft ของภาชนะความดันดังแสดงในตารางที่ 4) เมื่อรอยร้าวของภาชนะความดันในตัวอย่างที่กล่าวถึง (อาจจะเกิดจากการบกพร่องจากการผลิต หรือเกิดจากรอยร้าว หรือการกัดกร่อน) มีค่าถึง 0.50 in

ภาวะความตึงจะเกิดการ วิบัติขึ้น ดังนั้นค่าความปลอดภัยหรือน้ำหนักของโครงสร้างไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กับความต้านแรงดึงของวัสดุคงผลการคำนวณที่แสดงในตารางที่ 4) ซึ่งผลจากการคำนวณจริง ๆ ในตารางที่ 4) เราจะเห็นได้ชัดว่าเหล็กที่มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุดจะหนักมากที่สุด

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบน้ำหนักและราคาสำหรับภาวะความตึงยาว 1 ft

Steel	Yield Strength, σ_{ys} (ksi)	Assumed K_{IC} Values (ksi $\sqrt{\text{in.}}$)	Design Stress, σ_d (ksi)	$\frac{\sigma_d}{\sigma_{ys}}$	M_c	Q	Wall Thickness, t (in.)	Wt. of 12 in. Section (lb)	Assumed C	
									$\$/\text{lb}$ Steel	$\$/\text{ft}$ Vessel
A	260	80	70	0.27	1.0	1.47	1.07	342	1.40	480
B	220	110	86	0.40	1.1	1.43	0.87	275	1.40	385
C	180	140	100	0.56	1.2	1.42	0.75	240	1.00	240
D	180	220	124	0.72	1.43	1.36	0.60	186	1.20	225
E	140	260	140	1.0	1.51	1.25	0.54	173	0.50	85
F	110	170	109	0.99	1.25	1.25	0.69	221	0.15	35

วิธีการออกแบบที่นิยมใช้กันก็คือ เลือกใช้ค่าความปลอดภัยต่อการ วิบัติเนื่องจากการแตกหักหรือการคราก แต่มักนิยมใช้กับการ วิบัติทั้งสองชนิดมากกว่า โดยปกติภาวะความตึงจะออกแบบให้ความเค้นในผนัง เป็น เปอร์ เซ็นต์ส่วนหนึ่งของ σ_{ys} ดังนั้นค่าความปลอดภัยจะขึ้นอยู่กับความเค้น σ_{ys} ส่วนค่าความปลอดภัยต่อการแตกหักนิยมใช้ความต้านทานการแตกหัก K_{IC} เป็นหลัก ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างเพิ่มเติมจากตัวอย่างของภาวะความตึงดังต่อไปนี้

- 1) ใช้วิธีการออกแบบเดิมคือสมมติว่าการสร้างและประกอบเป็นไปอย่างดีไม่มีรอยร้าว และเลือกใช้ค่าความปลอดภัยต่อการครากเท่ากับ 2 ดังนั้นความเค้นออกแบบ $\sigma_d = \frac{1}{2} \sigma_{ys}$
- 2) ใช้วิธีการออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก เริ่มด้วยสมมติให้มีรอยร้าวขนาดใหญ่ที่สุด $a = 0.5 \text{ in}$ เหมือนตัวอย่างที่แล้ว และเลือกใช้ค่าความปลอดภัยต่อการแตกหักเท่ากับ 2 ดังนั้น $K_{Id} = \frac{1}{2} K_{IC}$

กรณี 1 การออกแบบวิธีนี้สามารถทำได้โดยง่ายดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร } \sigma_d = \frac{pD}{2t} = \frac{1}{2} \sigma_{ys} \quad \dots\dots\text{ก)}$$

ในที่นี้ σ_d = ความเค้นออกแบบสำหรับวัสดุแต่ละชนิดซึ่งสามารถหาค่าได้
 ดังนั้นความหนาของผนังภาชนะความดันมีค่าเป็น

$$t = \frac{pD}{2\sigma_d} \quad \dots\dots\text{ข)}$$

เมื่อทราบค่าความหนาของผนัง t เราก็สามารถคำนวณ หนัก น้ำหนัก และราคาของภาชนะ
 ต่อความยาว 1 ft ได้ดังนี้

$$\text{น้ำหนัก /ft} = \text{ความหนาแน่น} \times \text{ปริมาตร /ft}$$

$$\text{น้ำหนัก /ft} = \rho_{st} \times \pi D t \times 12 = 0.283(3.14)(30)(12) \text{ t lb}$$

$$\text{น้ำหนัก /ft} = 319.9 \text{ t lb} \quad \dots\dots\text{ค)}$$

$$\text{ราคา /ft} = w/\text{ft} \times c = 319.9 \text{ CT} \quad \dots\dots\text{ง)}$$

แทนค่า σ_{ys} และ D จากตารางที่ 1) และค่า c จากตารางที่ 4) ลงในสมการ
 ข), ค) และ ง) เราจะได้ค่า σ_d t น้ำหนักและราคาตั้งในตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าความหนา ราคาและน้ำหนักสำหรับกรณี $\sigma_d = \frac{1}{2} \sigma_{ys}$

Steel	Yield Strength σ_{ys} (ksi)	σ_d (ksi)	t (in.)	Weight (lb/ft)	Cost (\$/ft)
A	260	130	0.58	185	259
B	220	110	0.68	219	306
C	180	90	0.83	265	265
D	180	90	0.83	265	318
E	140	70	1.07	344	172
F	110	55	1.36	437	66

ผลจากตารางที่ 5) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเราเลือกใช้เหล็กที่มีค่า σ_{ys} สูง น้ำหนักของภาชนะความดันจะลดลง แต่การแตกหักมีโอกาสเป็นไปได้ ค่าความปลอดภัยรวมอาจจะลดลงก็จะได้เห็นได้จากตัวอย่างในกรณีที่ 2) ที่จะกล่าวต่อไป

กรณีที่ 2) การวิเคราะห์ในกรณีนี้คล้ายกับการวิเคราะห์ที่ผ่านมาแล้วคือให้ $K_I = K_{IC}$ สำหรับกรณีที่ต้องการให้ค่าความปลอดภัยต่อการแตกหักเท่ากับ 2 ดังนั้นความเค้นออกแบบและความหนาของภาชนะความดันสามารถคำนวณได้จากสมการ

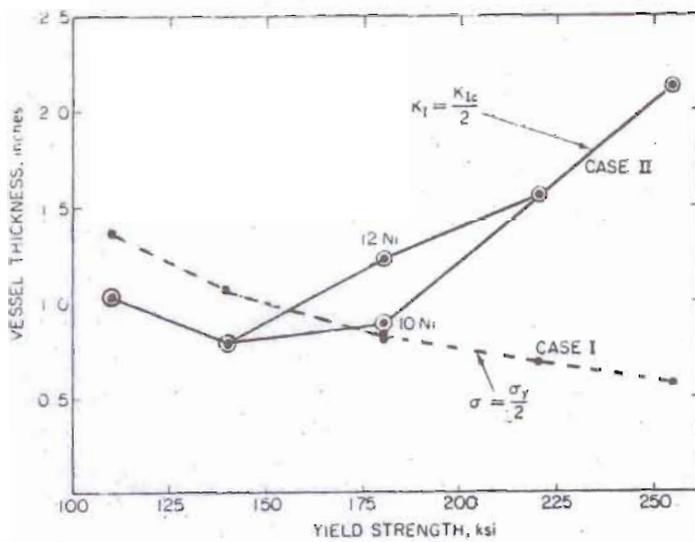
$$\sigma_d = \frac{\sqrt{Q} K}{1.1\sqrt{\pi} M_K \sqrt{a}} \quad \dots\dots 8)$$

$$t = \frac{pD}{2\sigma_d} \quad \dots\dots 9)$$

การคำนวณหาค่า σ_d และ t นั้นต้องใช้วิธีลองผิดลองถูก โดยสมมติค่า M_K , Q แล้วคำนวณค่าความหนา t จากนั้นก็ทำการตรวจสอบดูค่า M_K และ Q ว่าตรงกับที่สมมติหรือไม่ ถ้าไม่ตรงก็ทำการคำนวณซ้ำจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ดังแสดงในตารางที่ 6) เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ในตารางที่ 6) เราจะเห็นได้ชัดว่า ภาชนะความดันที่ทำจากวัสดุที่มีค่า σ_{ys} สูง แต่มีค่า K_{IC} ต่ำจะมีความหนามากที่สุด ซึ่งจะเป็นผลทำให้มีน้ำหนักและราคาสูงสุด ในทางตรงกันข้ามถ้าภาชนะความดันทำจากวัสดุที่มีค่า σ_{ys} ต่ำ แต่มีค่า K_{IC} สูงจะทำให้ความหนาที่มีค่าลดลง ซึ่งก็ทำให้น้ำหนักและราคาลดลงด้วยเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 6) เปรียบเทียบการคำนวณกรณี $K_{Id} = \frac{1}{2} K_{IC}$

Steel	Yield Strength σ_{ys} (ksi)	σ_d (ksi)	K_{IC} (ksi $\sqrt{in.}$)	K_I (ksi $\sqrt{in.}$)	t (in.)	Weight (lb/ft)	Cost (\$/ft)
A	260	35	80	40	2.14	687	962
B	220	48	110	55	1.56	501	702
C	180	61	140	70	1.23	394	394
D	180	86	220	110	0.87	280	336
E	140	95	260	130	0.79	253	127
F	110	72	170	85	1.04	337	50



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและความเค้นครากของภาชนะความดันในกรณี 1) และกรณี 2)

ความหนาของภาชนะความดันที่คำนวณได้จากกราฟวิเคราะห์ในกรณี 1) และ 2) เมื่อเลือกใช้เหล็กชนิดต่าง ๆ แสดงเปรียบเทียบกันดังในรูปที่ 9) ผลการเปรียบเทียบสามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ

- ก) สำหรับภาชนะความดันที่ทำจากเหล็กกล้าซึ่งมีค่า σ_{ys} ต่ำสุด จะเกิดการวิบัติโดยการครากตัวก่อนการแตกหัก
- ข) ส่วนภาชนะความดันที่ทำจากเหล็กกล้าซึ่งมีค่า σ_{ys} สูงสุด จะเกิดการวิบัติโดยการแตกหักก่อนการครากตัว
- ค) ค่าความปลอดภัยจากการคราก หรือจากการแตกหักของภาชนะความดันที่ทำจากเหล็กชนิดต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 7) ซึ่งผลอันนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นที่นักออกแบบจะต้องพิจารณาถึงโอกาสที่จะเกิดการวิบัติโดยการ -

ครากตัว หรือโดยการแตกหักของภาชนะความดันให้คัดเลือกก่อน ก่อนที่จะเลือกใช้วัสดุ และหาค่าความหนาที่เหมาะสมต่อไป

การวิเคราะห์ออกแบบภาชนะความดันที่กล่าวถึงข้างต้น ได้พิจารณาเปรียบเทียบหลักเกณฑ์การออกแบบโดยพิจารณาถึงการครากและการแตกหักเป็นหลัก ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้กลศาสตร์การแตกหักในระหว่างการเลือกออกแบบวัสดุสำหรับใช้งาน โดยเฉพาะการออกแบบภาชนะความดันที่ทำด้วยเหล็กกล้าเพื่อให้มีค่าความปลอดภัยต่อการครากหรือการแตกหักอย่างน้อยเท่ากับ 2 ภาชนะความดันจะมีหนึ่งหนาดังแสดงในตารางที่ 8) นอกจากนี้ตารางที่ 8) ยังมีน้ำหนักและราคาของภาชนะความดันต่อความยาว 1 ft รวมอยู่ด้วย ถ้าเราใช้เหล็กชนิด D ทำภาชนะความดันจะทำให้ภาชนะความดันมีน้ำหนักน้อยที่สุด แต่ถ้าเราใช้เหล็กชนิด F ทำภาชนะความดัน เราจะได้ภาชนะความดันที่มีราคาต่ำที่สุด

6. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงการนำเอากลศาสตร์การแตกหัก ซึ่งเป็นวิชาที่กล่าวถึงอิทธิพลของรอยร้าวที่มีผลต่อการแตกหักของชิ้นงาน มาใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รวมทั้งการออกแบบรูปร่างและขนาดของชิ้นงานต่างๆ ซึ่งทำให้ชิ้นงานสามารถรับภาระได้อย่างปลอดภัย เพื่อเป็นตัวอย่างการใช้กลศาสตร์การแตกหักในการออกแบบบทความนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ความวิบัติของโครงจรวดขนาด 60 in ขณะทำการทดสอบด้วยน้ำ และการวิเคราะห์ความวิบัติของส่วนยึดปีกเครื่องบิน F-111 นอกจากนี้บทความยังได้แสดงตัวอย่างการใช้กลศาสตร์การแตกหักสำหรับเลือกวัสดุในการออกแบบภาชนะความดันผนังบาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 in อยู่ภายใต้ความดันภายใน 5000 psi อีกด้วย

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยสำหรับกรณีออกแบบโดยใช้การคราก และการแตกหักเป็นหลัก

Steel	Yield Strength, σ_{ys} (ksi)	t (in.)	Factor of Safety Against Yielding	Factor of Safety Against Fracture	Required Thickness to Satisfy Both Criteria (in.)
A	260	0.58	2.0	0.37	2.14
		2.14	7.42	2.0	
B	220	0.68	2.0	0.67	1.56
		1.56	4.58	2.0	
C	180	0.83	2.0	0.96	1.23
		1.23	2.95	2.0	
D	180	0.83	2.0	1.51	0.87
		0.87	2.09	2.0	
E	140	1.07	2.0	3.21	1.07
		0.79	1.07	2.0	
F	110	1.36	2.0	2.70	1.36
		1.04	1.29	2.0	

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบราคาและน้ำหนักของภาชนะความดันต่อความยาว 1 ฟุตในกรณีออกแบบโดยใช้การคราก และการแตกหักเป็นหลัก (ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2)

Steel	Yield Strength σ_{ys} (ksi)	t (in.)	Weight (lb/ft)	Cost (\$/ft)
A	260	2.14	687	962
B	220	1.56	501	702
C	180	1.23	394	394
D	180	0.87	280	336
E	140	1.07	344	172
F	110	1.36	437	66

7. เอกสารอ้างอิง

- 1) Rolfe, S.T. and Barsom, J.M. (1977), Fracture and Fatigue Control in Structures : Application of Fracture Mechanics, Prentice Hall, New Jersey.
- 2) จำลอง ลิมตระกูล (2526), กลศาสตร์การแตกหักเบื้องต้น, วิศวกรรมสาร มช. ปีที่ 10 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม - กันยายน