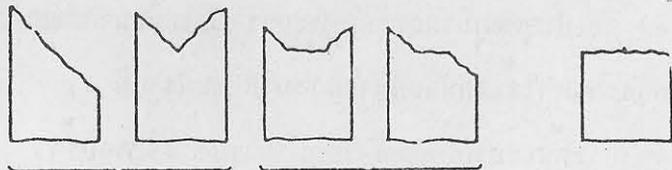


การออกแบบเพื่อต้านทาน การแตกหักแบบเปราะ

ดร. จำลอง ลิมตระกูล*

1. การแตกหักแบบเปราะ

การแตกหักของโครงสร้างที่ทำด้วยเหล็ก อาจเกิดขึ้นได้ทั้งแบบเหนียวและแบบเปราะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของการรับภาระต่างๆ เช่น อุณหภูมิ อัตราการรับภาระ และเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ การแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) โดยทั่วไปทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร และรอยแตกหักเกิดขึ้นท่ามกลาง 45 องศา กับทิศของความเค้นที่มากระทำ มีลักษณะเหมือนถูกเฉือน เช่นดังในรูปที่ 1ก) ส่วนการแตกหักแบบเปราะ (brittle หรือ cleavage fracture) เกิดขึ้นโดยมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรน้อย รอยแตกหักตั้งฉากกับทิศของความเค้นหลักและมีลักษณะแนวราบ เช่นดังในรูปที่ 1ค) นอกจากนี้วัสดุซึ่งเกิดการแตกหักแบบเหนียวในสภาพสิ่งแวดล้อมปกติ อาจจะมีการแตกหักแบบเปราะได้ถ้าสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น เรือบรรทุกสินค้าในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2) ซึ่งใช้งานได้ดีในน้ำจืด จะเกิดการแตกหักแบบเปราะเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ในทำนองเดียวกับภาชนะความดัน ซึ่งใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิปกติ จะเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ ถ้าอุณหภูมิลดต่ำลงที่ความดันคงที่

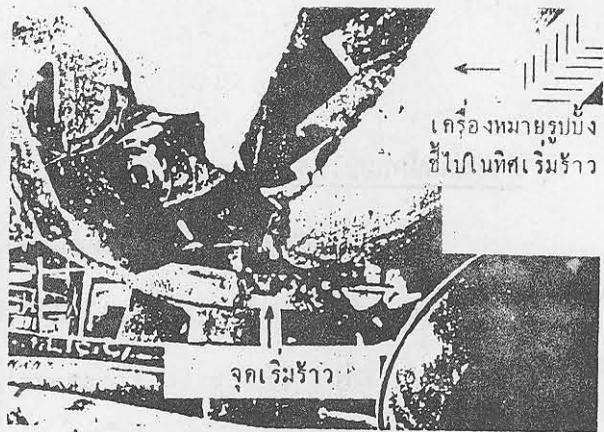
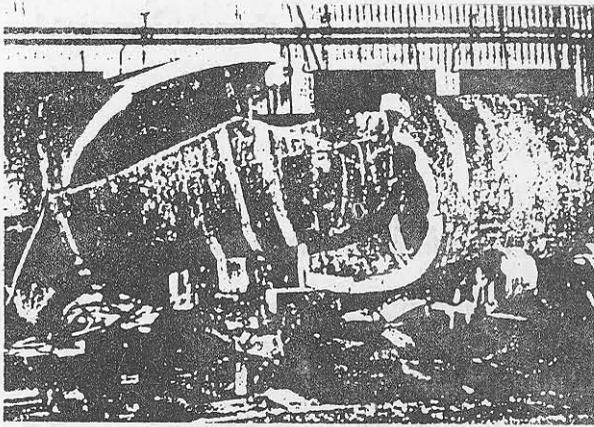


ก) แบบเหนียว ข) แบบเหนียว-เปราะ ค) แบบเปราะ

รูปที่ 1 ลักษณะของการแตกหักโดยทั่วไป [1]

การแตกหักแบบเปราะเป็นการเสียหายที่ร้ายแรงที่สุด เนื่องจากอาจเกิดขึ้นที่ความเค้นต่ำกว่าจุดครากและไม่ทราบล่วงหน้า รูปที่ 2) แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะของภาชนะความดันผนังหนา เมื่อพิจารณาผิวของรอยแตกหักเราก็สามารถหาจุดเริ่มต้นของการแตกหักได้ ที่บริเวณดังกล่าวจะมีเครื่องหมายเป็นรูปบั้ง (chevron) หรือเหมือนก้างปลาเซอริง (herring bone) และชี้ในทิศทางซึ่งเริ่มเกิดรอยร้าว ซึ่งโดยทั่วไปจะพบตรงบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่น เช่นบริเวณที่มีรอยตำหนิหรือเปลี่ยนขนาดรูปที่ 3) แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะของหม้อผลิตไอน้ำในระหว่างการอัดทดสอบด้วยน้ำ

* รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

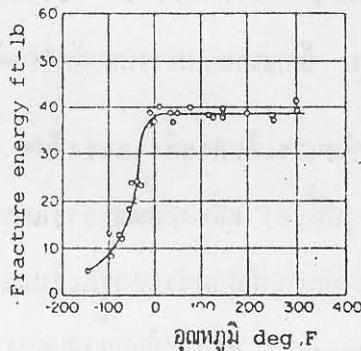


รูปที่ 2 การแตกหักแบบเปราะของภาชนะความดันซึ่งเกิดในขณะที่ทำการอัดทดสอบด้วยน้ำ [2]

รูปที่ 3 การแตกหักแบบเปราะของหม้อผลิตไอน้ำซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการอัดทดสอบด้วยน้ำ [3]

การแตกหักแบบเปราะจะเกิดขึ้นได้ถ้ามีสถานการณ์สามอย่างเกิดขึ้น พร้อมๆ กัน ดังนี้คือ

- ก) ความเค้นมีค่าสูง
- ข) วัสดุมีแนวโน้มที่จะมีพฤติกรรมแบบเปราะเนื่องจากสภาพสิ่งแวดล้อม เช่น ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ไม่มีความเหนียว หรือ NDT (Nil Ductility Temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิวิกฤตที่ลักษณะการวิบัติเปลี่ยนจากแบบเหนียวไปเป็นแบบเปราะ และพลังงานทำให้แตกหักลดลงอย่างมาก เช่นดังรูปที่ 4)
- ค) มีเครื่องกระตุ้นเช่นรอยตำหนิ รอยบาก ร่อง หรือรอยร้าว



รูปที่ 4 กราฟ impact energy สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน

หลักสำคัญของการออกแบบเพื่อต้านทานการแตกหักแบบเปราะหรือ การออกแบบโดยใช้วัสดุเปราะก็คือ ป้องกันไม่ให้สถานการณ์ที่กล่าวถึงทั้งสามเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ซึ่งทำให้เกิดวิธีการออกแบบขึ้น 3 วิธีดังนี้คือ

- ก) การออกแบบโดยให้ความเค้นใช้งานต่ำ
- ข) การออกแบบโดยใช้อุณหภูมิทรานซิชัน (Transition temperature) และ
- ค) การออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

รายละเอียดของการออกแบบแต่ละวิธีจะได้อธิบายถึงในตอนต่อไป

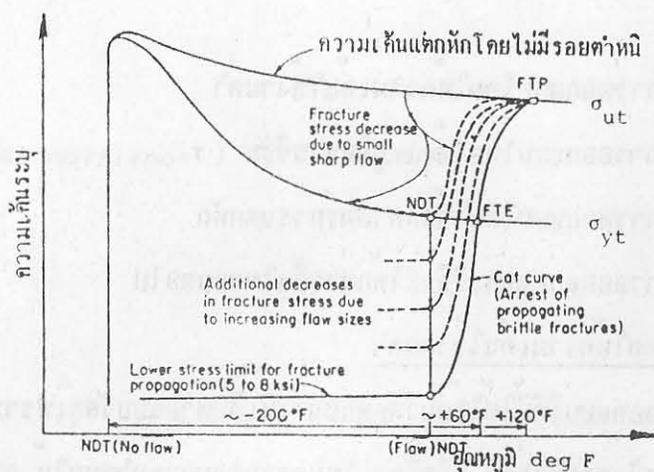
2. การออกแบบโดยให้ความเค้นใช้งานต่ำ

การออกแบบวิธีนี้ใช้กับวัสดุทุกชนิด ที่เสียหายแบบวัสดุเปราะในสภาพการใช้งานต่างๆ และมีร่องรอยตำหนิ รอยขีดข่วน หรืออื่นๆ ในการออกแบบจะกำหนดให้ ความเค้นออกแบบหรือความเค้นใช้งานมีค่าต่ำ (ซึ่งทำให้มีค่าความปลอดภัยสูง) ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงการแตกหักแบบเปราะตามสถานการณ์ที่ 1 ตัวอย่างเช่น ขวดแก้วที่ใส่น้ำอัลคอล์ม เป็นภาชนะความดันที่ใช้งานได้ดี ถึงแม้ว่าจะทำจากวัสดุที่มีค่าความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) ต่ำ และมีรอยตำหนิหรือรอยบากที่มีความเค้นหนาแน่นสูง ขวดแก้วใช้งานได้ดีเนื่องจากความเค้นใช้งานมีค่าต่ำมากหรือมีค่าความปลอดภัยสูงนั่นเอง

3. การออกแบบโดยใช้อุณหภูมิทรานซิชัน

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าผสมต่ำส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมการวิบัติ เปลี่ยนจากเหนียวเป็นแบบเปราะ ในช่วงอุณหภูมิทรานซิชันแคบๆ เช่นดังในรูปที่ 4) ดังนั้นหลักที่นิยมใช้ในการออกแบบในกรณีเช่นนี้ ก็คือกำหนดให้อุณหภูมิใช้งานอยู่ในช่วงที่ทำให้วัสดุมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวอยู่เสมอ ซึ่งก็จะไม่ทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะตามสถานการณ์ที่ 2

Pellini และ Puzak[4] ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นแตกหัก (Fracture stress) และอุณหภูมิที่สภาวะการใช้งานต่างๆ ของเหล็ก ได้แผนผังสำหรับวิเคราะห์การแตกหัก (Fracture Analysis Diagram : FAD) ของเหล็กกล้าซึ่งมีลักษณะทั่วไปดังในรูปที่ 5) จากรูปที่ 5) เราจะเห็นได้ชัดว่า สำหรับเหล็กที่ไร้รอยตำหนิ ค่า σ_{ut} และ σ_{yt} จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง และ σ_{ut} และ σ_{yt} จะมีค่าเท่ากันที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เมื่อไม่มีการยึดตัวลดลงของพื้นที่หน้าตัดของอุณหภูมิที่จุดนี้เรียกว่า "อุณหภูมิทรานซิชันไร้ความเหนียวไร้รอยตำหนิ (NDT-no flow)" ดังนั้นถ้าใช้งานเช่นภาชนะความดันไม่มีรอยตำหนิ เราก็ไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติการแตกหักแบบเปราะของเหล็กที่ใช้ในลักษณะเดียวกัน วัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงสภาพดังกล่าว ก็จะมีโอกาสเกิดการแตกหักแบบเปราะได้น้อย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบและการผลิต สำหรับวัสดุที่มีการขยายตัวทั่วไป จะมีรอยตำหนิเล็กๆ อยู่ภายในเสมอ ซึ่งจะทำให้ความเค้นแตกหักของวัสดุลดลง

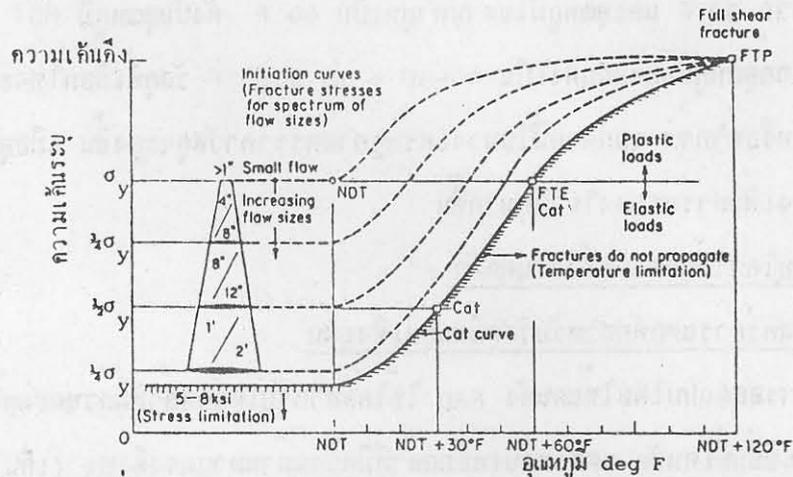


รูปที่ 5 Transition Temperature Features of Steel [4 , 5]

ในบริเวณอุณหภูมิทรานซิชัน อุณหภูมิสูงสุดที่ค่าความเค้นแตกหักของวัสดุที่มีรอยตำหนิเล็ก ๆ ลดลงจนสัมพันธ์กับกราฟของเหล็กกล้า เรียกว่า อุณหภูมิทรานซิชันไร้ความเหนียว NDTT (Nil Ductility Transition Temperature) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า NDTT กราฟความเค้นแตกหักของวัสดุที่มีรอยตำหนิเล็ก ๆ (เส้นประ) จะทับกับกราฟของ σ_{yt} (เส้นเต็ม) ดังในรูปที่ 5 ที่อุณหภูมิ NDTT กราฟความเค้นแตกหักจะมีค่าลดลง เมื่อขนาดของรอยตำหนิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความเค้นที่ลดลงนี้จะแปรผกผันกับรากที่สองของขนาดรอยร้าว ดังนั้นจะได้ผลเป็นกลุ่มของกราฟความเค้นแตกหัก ซึ่งแสดงการเพิ่มของความเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหักที่อุณหภูมิสูงกว่า NDTT กราฟเส้นขอบล่างของกลุ่มนี้เรียกว่า อุณหภูมิที่หยุดการร้าว หรือ CAT (Crack Arrest Temperature) กราฟ CAT นี้กำหนดอุณหภูมิที่การแตกหักแบบเปราะหยุดการขยายตัว ที่ระดับความเค้นที่กระทำกับชิ้นงานค่าต่างๆ นอกจากนี้กราฟ CAT ยังเป็นกุญแจสำหรับการออกแบบและใช้งานภาชนะความดัน และมีลักษณะที่สำคัญ 3 อย่างคือ

- ก) อุณหภูมิต่ำกว่า NDT และระดับความเค้นชั้นล่างช่วงค่า 5-8 ksi รอยร้าวจะไม่ขยายตัว เนื่องจากปริมาณพลังงานความเครียดยืดหยุ่นที่ปล่อยออกมาที่ความเค้นต่ำจะมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้รอยร้าวขยายตัว
- ข) อุณหภูมิ CAT ที่ระดับความเค้นเท่ากับ σ_{yt} เรียกว่า อุณหภูมิ Fracture Transition Elastic (FTE) และเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่รอยร้าวขยายตัวที่ระดับความเค้นยืดหยุ่น อุณหภูมิ FTE อยู่สูงกว่าอุณหภูมิ NDT ประมาณ 60 °F
- ค) อุณหภูมิ CAT ที่ระดับความเค้นเท่ากับ σ_{ut} เรียกว่า อุณหภูมิ Fracture Transition Plastic (FTP) การแตกหักที่เกิดขึ้นเป็นแบบเฉือนที่ระดับความเค้น σ_{ut} ของวัสดุ อุณหภูมิ FTP นี้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ NDT ประมาณ 120 °F

ในแผนผังอุณหภูมิทรานซิชันหรือแผนผัง FAD ความเค้นเกิดขึ้นจากภาวะที่กระทำร่วมกับความเค้นตกค้างจากการผลิตเช่นจากการเชื่อม แผนผัง FAD มีจุดอ้างอิงหลัก 4 จุดซึ่งอาจใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการออกแบบ สำหรับเลือกใช้เหล็กกล้าให้ปลอดภัยจากการแตกหัก ความเค้นออกแบบหรืออุณหภูมิใช้งานต่ำสุดคงแสดงในรูปที่ 6)



รูปที่ 6 Fracture Analysis Diagram for the Engineering Selection of Fracture-Safe Steels Based on the NDT Temperature [4 , 5]

หลักเกณฑ์ในการออกแบบโดยใช้กราฟ FAD มีดังนี้คือ

ก) ใช้อุณหภูมิ NDT หลักเกณฑ์นี้พิจารณาว่ามีความเค้นระดับ σ_{yt} กระทำกับชิ้นงานซึ่งมีรอยตำหนิน้อยกว่า 1 in ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิ NDT เราก็จะแน่ใจได้ว่าพฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบเหนียว ซึ่งจะช่วยป้องกันการแตกหักโดยไม่ทำให้เริ่มเกิดมีรอยร้าว แต่ไม่ช่วยทำให้รอยร้าวหยุดขยายตัวได้

ข) ใช้อุณหภูมิ NDT บวก 30 °F หลักเกณฑ์นี้คิดว่า มีความเค้นระดับ $\frac{1}{2}\sigma_{yt}$ กระทำ นิยมใช้ออกแบบภาชนะความดันในทางการค้า ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิ NDT บวก 30 °F เราไม่จำเป็นต้องพิจารณาปัญหาขนาดของรอยร้าวซึ่งหมายความว่า การแตกหักจะไม่เกิดขึ้นหรือขยายตัวในสนามความเค้นที่กำหนด

ค) ใช้อุณหภูมิ NDT บวก 60 °F หลักเกณฑ์นี้คล้ายกับหลักเกณฑ์ ข) เว้นแต่ระดับความเค้นเท่ากับ σ_{yt} นิยมใช้สำหรับภาชนะความดันที่รับความเค้นสูงหรือทดสอบที่ความดันสูง สภาพความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิรุนแรง นิยมใช้กันบ่อยในทางวิศวกรรม และเป็นหลักเกณฑ์ที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์ทางนิวเคลียร์ของ ASME

ง) ใช้อุณหภูมิ NDT บวก 120 °F หลักเกณฑ์นี้พิจารณาว่าภาชนะความดัน จะมีความเค้นสูงกว่าค่า σ_{yt} และจำกัดให้อุณหภูมิใช้งานเท่ากับอุณหภูมิการแตกหักแบบเฉือนอย่างเฉียว ทำให้มีความต้านทานการแตกหักอย่างสูงสุด

หลักเกณฑ์การออกแบบเหล่านี้สัมพันธ์กับการผลิต การออกแบบขนาดของรอยร้าวและระดับความดันที่มีผล เนื่องจากสภาพการใช้งาน ซึ่งทั้งหมดนี้ต้องใช้การวินิจฉัยทางวิศวกรรม เพื่อแสดงการให้แผนผัง NDT สมมติว่าจากการพิจารณาของวิศวกรที่ออกแบบ กำหนดให้ใช้หลักเกณฑ์ที่สองซึ่งคือ อุณหภูมิ NDT บวก 30 °F และอุณหภูมิใช้งานต่ำสุดเป็น 40 °F ดังนั้นอุณหภูมิ NDT ของวัสดุสูงสุดที่ยอมให้ใช้ได้จากสเกลอุณหภูมิของแผนผังเป็น 40-30 = 10 องศา F วัสดุที่เลือกใช้จะต้องมีอุณหภูมิ NDT เท่ากับ 10 °F หรือต่ำกว่า นอกจากนี้ในทางเศรษฐศาสตร์ราคาวัสดุจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิ NDT ลดลง เนื่องจากจะต้องเพิ่มสารผสมลงในวัสดุมากขึ้น

4. การออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

4.1 กลศาสตร์การแตกหักสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น

การออกแบบโดยใช้แผนผัง FAD ใช้ได้สำหรับเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมต่ำถึงปานกลาง ซึ่งมีอุณหภูมิทรานซิชันที่เค้นชัก แต่สำหรับเหล็กกล้าที่มีความต้านทานแรงดึงสูง (เกิน 150 ksi หรือ เกิน 1034 MPa) อลูมิเนียมผสมและไททานเนียมผสม อุณหภูมิทรานซิชันจะไม่เค้นชัก แต่จะกระจายเป็นช่วงกว้าง ดังนั้นการออกแบบเพื่อป้องกันการแตกหักแบบเปราะวิธีนี้จึงใช้ไม่ได้ เราต้องใช้กลศาสตร์การแตกหัก (Fracture Mechanics) ซึ่งพิจารณาถึง คุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างของรอยตำหนิ และระดับความเค้นใช้งาน หลักเกณฑ์ที่ใช้ก็คือจำกัดขนาดของ รอยร้าวหรือรอยตำหนิ ให้มีขนาดไม่เกินค่าสูงสุดที่ยอมให้ได้ตามความเหนียวของวัสดุ และ ระดับความเค้นที่กระทำ

รอยร้าวในชิ้นงานอาจจะพิจารณาได้ว่าเป็นรูปร่างรีที่แกนสั้นหดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ชิ้นงานแผ่นบางที่มีรูปร่างรีเล็กๆ ตรงกลางรับภาระแบบดึงในแนวแกนที่ติดตั้งจากกับแกนยาวของวงรีจะเกิดความเค้นสูงสุดขึ้นที่ขอบวงรี (ปลายแกนยาว) มีค่าเป็น

$$\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2\frac{a}{b}) \quad \dots 1)$$

โดยที่ a = ครึ่งหนึ่งของแกนยาว

b = ครึ่งหนึ่งของแกนสั้น

σ = ความเค้นที่กระทำกับชิ้นงาน

สมการที่ 1 อาจเขียนให้อยู่ในรูปที่มีความโค้ง ρ ที่ปลายแกนยาวของวงรีได้ดังนี้

$$\text{เนื่องจาก } \rho = \frac{b^2}{a} \text{ สำหรับรูปร่างรี}$$

$$\text{ดังนั้น } \sigma_{\max} = \sigma[1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}] \quad \dots 2)$$

ในกรณีรอยร้าว $b \rightarrow 0$ a จะเป็นครึ่งหนึ่งของรอยร้าวและเป็นครึ่งแกนยาวของวงรีด้วย

สำหรับวงรีที่มีลักษณะคล้ายรอยร้าว ซึ่ง $\rho \rightarrow 0$ สมการที่ 1) จะมีรูปเป็น [จาก 1)]

$$\sigma_{max} = 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \dots 3)$$

ดังนั้นค่าความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor) สำหรับรอยร้าวที่แหลมมากๆ จะมีรูปเป็น

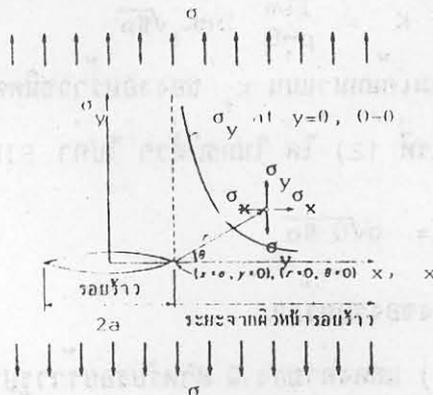
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \dots 4)$$

แตรอยร้าว เจงพิจารณาได้ว่าเป็นรูปร่างวงรีที่มีแกนสั้นลดลงมากๆ (ค่า $b \rightarrow 0$) ดังนั้นค่าความเค้นหนาแน่นจะแปรผันกับ $\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ ค่าความต้านทานการแตกหัก (Fracture Toughness) ของวัสดุเพราะที่ค่า K_t นี้ บริเวณรอยร้าวทำให้เกิดความเค้นสูงสุดเกินค่าความเค้นเฉลี่ยที่กระทำกับชิ้นงาน การศึกษาการกระจายของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว และเสถียรภาพของรอยร้าว ซึ่งสมมติว่าความเค้นแปรผันโดยตรงกับความเครียดเรียกว่า กลศาสตร์การแตกหักของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นหรือเรียกโดยย่อว่า LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics)

ทฤษฎี LEFM ได้หลักเกณฑ์มาจากผลงานของ Griffith และ Irwin ในช่วงต้นปีทศวรรษที่ 1920 Griffith ได้เสนอหลักเกณฑ์พลังงานสำหรับการเสียหายแบบเปราะ และได้ทำการทดลองเกี่ยวกับรูปทรงกลมเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีที่เขาเสนอไว้ Irwin ได้ขยายทฤษฎีของ Griffith เพื่อให้รวมถึงอิทธิพลของงานพลาสติก ซึ่งใช้ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปขึ้นอย่างถาวรได้ด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการกระจายของความเค้นและความเครียดบริเวณปลายรอยร้าว และอัตราการปล่อยหรือลดลงของพลังงานความเครียด (strain energy release rate) ต่อรอยร้าวที่ขยายเพิ่มขึ้น

4.2 การกระจายของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว [6]

การกระจายของความเค้นที่บริเวณปลายรอยร้าวในชิ้นงานแผ่นกว้างอนันต์ มีรอยร้าวทะลุตลอดความหนา อยู่ภายใต้แรงดึงตั้งฉากกับรอยร้าวดังในรูปที่ 7) มีค่าเป็นดังนี้



รูปที่ 7 ชิ้นงานแผ่นกว้างมีรอยร้าวทะลุตรงกลางตั้งฉากกับแนวที่ความเค้นดึงกระทำ

$$\sigma_x = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad \dots\dots 5)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad \dots\dots 6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad \dots\dots 7)$$

ที่บริเวณหน้าขอบรอยร้าว $\theta = 0$ ความเค้นจะมีค่าเป็น $\sigma_x = \sigma_y = \sigma\sqrt{\frac{a}{2r}}$ และ $\tau_{xy} = 0$

สมการที่ 5) 6) และ 7) แสดงให้เห็นชัดว่าความเค้นบริเวณรอยร้าวขึ้นอยู่กับค่าผลคูณของความเค้นระบุ (σ) และรากที่สองของขนาดรอยร้าว (\sqrt{a}) ผลคูณนี้เรียกว่าค่าความเค้นเข้มข้น หรือเรียกย่อๆ ว่า SIF (Stress Intensity Factor) มีหน่วยเป็น $\text{psi} \sqrt{\text{in}}$ หรือ $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ ค่า SIF สำหรับรอยร้าวแบบแหลมที่ทะลุตลอดแผ่นกว้าง มีขนาดอนันต์ดังในรูปที่ 7) กำหนดค่านิยามไว้

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad \dots\dots 8)$$

ดังนั้นสมการของความเค้นบริเวณปลายรอยร้าวในเทอมของ SIF, K จะมีรูปเป็นดังนี้

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad \dots\dots 9)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad \dots\dots 10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad \dots\dots 11)$$

จากสมการที่ 9) 10) และ 11) เราจะเห็นได้ชัดแล้วว่า SIF (K) เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งกำหนดความรุนแรงของความเค้นบริเวณรอยร้าว

เปรียบเทียบสมการที่ 3) และ 8) เราจะพบว่าค่า SIF (K) แปรผันโดยตรงกับค่าความเค้นหนาแน่นยึดหยุ่นสูงสุด K_t เมื่อรัศมีปลายรอยร้าว ρ เข้าใกล้ศูนย์ตามสมการ

$$\text{SIF } K = \lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{1}{2} \sigma K_t \sqrt{\pi \rho} \quad \dots\dots 12)$$

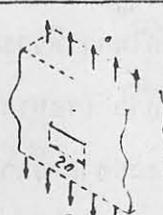
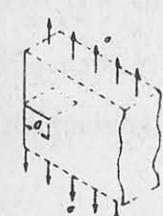
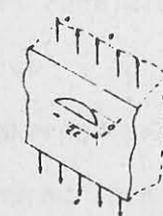
ดังนั้นถ้าเราทราบค่าความเค้นหนาแน่น K_t ของรอยร้าวชนิดต่างๆ ในโครงสร้าง เราก็สามารถหาค่า SIF (K) จากสมการที่ 12) ได้ ในกรณีทั่วๆ ไปค่า SIF จะมีรูปเป็นดังนี้

$$K = \sigma\sqrt{Q \pi a} \quad \dots\dots 13)$$

โดยที่ $Q =$ ฟังก์ชันรูปร่างของรอยร้าว

ตารางที่ 1) แสดงค่าของ Q สำหรับรอยร้าวรูปร่างต่างๆ ภายในชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ มากจนขอบผิววนอกไม่มีอิทธิพลต่อสนามความเค้นที่ปลายรอยร้าว

ตารางที่ 1 ค่าความเค้นเข้มข้น SIF สำหรับชิ้นงานที่รับภาระแบบดึง K_I [7, 8]

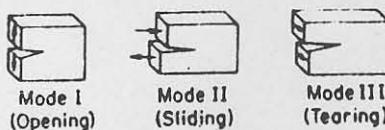
ชนิดของรอยร้าว	ค่า ϕ	ค่า K_I	ชนิดของรอยร้าว	ค่า ϕ	ค่า K_I																												
กรณี 1 Infinite Plate with Central Through Crack. 	1.0	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$	กรณี 4 Internal Elliptical Crack in an Infinite Body 	$\frac{1}{\phi}$	$K_I = \frac{\sigma}{\phi} \sqrt{\pi a}$ (ดูหมายเหตุ)																												
กรณี 2 Semi-Infinite Plate with Through Edge Crack. (Long Shallow Surface Crack) 	1.2	$K_I = 1.1\sigma \sqrt{\pi a}$	กรณี 5 Semi-Infinite Body with Elliptical Surface Crack. 	$\frac{1.2}{\phi}$	$K_I = \frac{1.1\sigma}{\phi} \sqrt{\pi a}$ (ดูหมายเหตุ)																												
กรณี 3 Internal Circular Crack in an Infinite Body. 	$\frac{4}{\pi}$	$K_I = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\pi}}$	หมายเหตุ $\phi = \int_0^{\pi/2} \left(1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \theta d\theta\right)^{1/2}$ ϕ Is the Complete Elliptic Integral Function Whose Value is: <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <thead> <tr> <th>a/c</th> <th>ϕ</th> <th>a/c</th> <th>ϕ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0</td><td>1.000</td><td>0.6</td><td>1.277</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>1.016</td><td>0.7</td><td>1.345</td></tr> <tr><td>0.2</td><td>1.051</td><td>0.8</td><td>1.418</td></tr> <tr><td>0.3</td><td>1.097</td><td>0.9</td><td>1.493</td></tr> <tr><td>0.4</td><td>1.151</td><td>1.0</td><td>$\pi/2$</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>1.211</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> For Elliptical Cracks: a = Length of Semi-Minor Axis. c = Length of Semi-Major Axis.			a/c	ϕ	a/c	ϕ	0.0	1.000	0.6	1.277	0.1	1.016	0.7	1.345	0.2	1.051	0.8	1.418	0.3	1.097	0.9	1.493	0.4	1.151	1.0	$\pi/2$	0.5	1.211		
a/c	ϕ	a/c	ϕ																														
0.0	1.000	0.6	1.277																														
0.1	1.016	0.7	1.345																														
0.2	1.051	0.8	1.418																														
0.3	1.097	0.9	1.493																														
0.4	1.151	1.0	$\pi/2$																														
0.5	1.211																																

4.3 ชนิดของการเปลี่ยนรูปของผิวรอยร้าว

ในทางกลศาสตร์การแตกหัก การเสียหายพื้นฐานของผิวรอยร้าวมีอยู่ 3 แบบ ดังในรูปที่

8) ดังนี้คือ

- 1) Mode I หรือ Opening Mode ผิวรอยร้าวแยกจากกันในทิศตั้งฉากกับรอยร้าว เช่นดังในรูปที่ 8ก) ค่า SIF คือ K_I
- 2) Mode II หรือ Edge Sliding Mode ผิวรอยร้าวถูกเฉือนในทิศขนานกับผิวรอยร้าวให้เลื่อนออกจากกันดังในรูปที่ 8ข) ค่า SIF คือ K_{II}



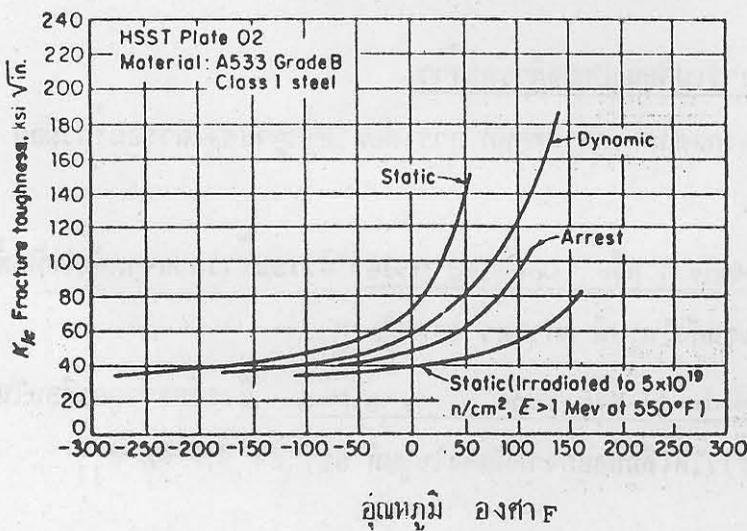
ก) ข) ค)

รูปที่ 8 การเปลี่ยนขนาดพื้นฐาน 3 แบบ ของผิวรอยร้าว

3) Mode III หรือ Tearing Mode ผิวยรอยร้าวถูกดึงให้ลึกขาดในทิศความหนาของชิ้นงาน เช่นดังในรูปที่ 8ค) ค่า SIF คือ K_{III}

เนื่องจากค่า SIF K_I , K_{II} และ K_{III} เป็นพารามิเตอร์ที่แทนถึงความรุนแรงของสนามความเค้นบริเวณปลายรอยร้าว ดังนั้นค่า SIF เหล่านี้คือเหมาะที่จะใช้เป็นหลักในการพิจารณาความเสียหายของวัสดุได้เป็นอย่างดี ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าชิ้นงานเกิดการเสียหาย (รอยร้าวขยายตัว) ที่ความเค้นเฉลี่ยตลอดหน้าตัดของชิ้นงานต่ำกว่า $0.8 \sigma_{yt}$ ขอสสมมติพื้นฐานของกลศาสตร์การแตกหักก็คือ การแตกหักอย่างไม่เสถียร (รอยร้าวขยายตัวโดยไม่ต้องเพิ่มความเค้นที่กระทำ) จะเกิดขึ้นเมื่อค่า SIF (K) ถึงค่าวิกฤต K_C ซึ่งเรียกว่าเป็นค่าความต้านทานการแตกหัก (Fracture Toughness) ของวัสดุ ค่า K_C ที่ได้จากการทดลองเมื่อยรอยร้าวเริ่มเกิดการขยายตัวขึ้นมีอยู่หลายชนิด เช่น

- K_{IC} ค่าความต้านทานการแตกหักอย่างสถิตย์
- K_{Id} ค่าความต้านทานการแตกหักอย่างพลวัต
- K_{Ia} ค่าความต้านทานการแตกหักสำหรับหยุดการขยายตัวของรอยร้าว



รูปที่ 9 ค่า K_{IC} , K_{Id} & K_{Ia} ของแผ่นเหล็กอย่างหนาผสม $M_n - M_o$ [9]

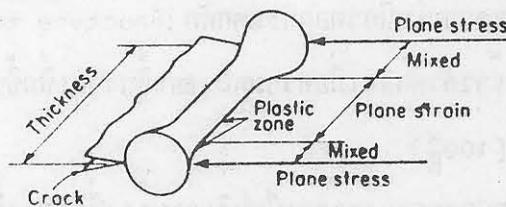
รูปที่ 9) แสดงค่าความต้านทานการแตกหักทั้งสามชนิดเปรียบเทียบกันของแผ่นเหล็กกล้าผสม $M_n - M_o$ อย่างหนา ซึ่งใช้กับภาวะความดันสำหรับเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นอกจากนี้ยังได้แสดงค่า K_{IC} ของเหล็กชนิดเดียวกัน เมื่อได้รับรังสีอย่างรุนแรงทำให้ค่า K_{IC} ลดลงจากเดิมมาก เช่นที่ $50^\circ F$ ค่า K_{IC} จะลดลงจาก 140 ไปเป็น $45 \text{ ksi} \sqrt{\text{in}}$ เมื่อได้รับรังสี $5 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$

ค่า K_C เป็นค่า SIF สูงสุดซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุและไม่ขึ้นอยู่กับสภาพของภาระที่กระทำกับชิ้นงาน ซึ่งแตกต่างจากค่า SIF, K ที่เป็นความรุนแรงของสนามความเค้นปลายรอยร้าว ค่า SIF, K นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของความเค้นและรากที่สองของขนาดรอยร้าว

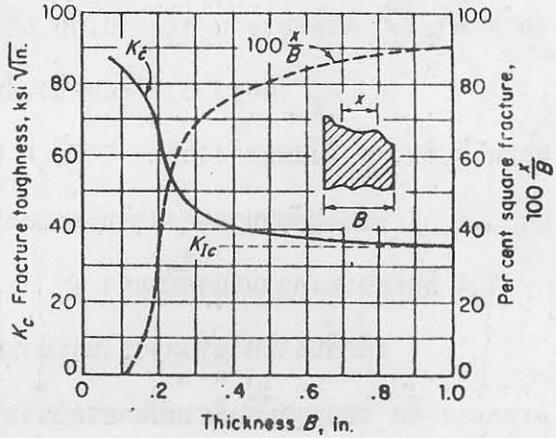
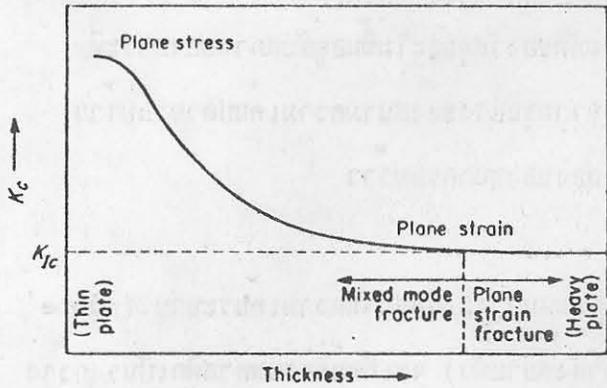
4.4 อิทธิพลของความหนาที่มีต่อค่า K_C

เมื่อชิ้นงานบางรับภาระในระนาบของความหนา จะเกิดสภาพความเค้นระนาบ (plane stress) ขึ้น นอกจากนี้ที่บริเวณปลายรอยร้าว (ที่กำลังขยายตัว) จะเกิดบริเวณพลาสติกเป็นวงกว้างโดยรอบ ชิ้นงานจะเสียหายในลักษณะแตกหักเนื่องจากการเฉือนเป็นมุมเอียง 45° เช่นดังในรูป 1ก) และ 1ข) ซึ่งเป็นการแตกหักผสมของ Mode I และ II

ถ้าชิ้นงานรับภาระในระนาบของความหนา จะเกิดสภาวะความเค้นระนาบขึ้น เนื่องจากความเค้นในทิศของความหนาจะถูกความหนาของวัสดุต้านเอาไว้ ในขณะที่เกิดการขยายตัวของรอยร้าวจะเกิดบริเวณพลาสติกเล็ก ๆ โดยรอบ ผิวแตกหักมีลักษณะเรียบ แบบ Mode I เช่นดังในรูปที่ 1ค) จากทฤษฎีความยืดหยุ่นเมื่อความเค้นในทิศของความหนา (z) ϵ_z มีค่าเป็นศูนย์ จะเกิดสภาวะความเค้นระนาบขึ้นที่บริเวณด้านในของชิ้นงาน เช่น ดังในรูปที่ 10) และค่า K_C ก็จะแปรผันตามความหนาของวัสดุ รูปที่ 11) แสดงอิทธิพลของความหนาของวัสดุที่มีต่อค่า K_C และลักษณะการแตกหักของรอยร้าว ในรูปของ % ความเรียบของรอยร้าวแตกหัก (percent square fracture)



รูปที่ 10 สภาพของความเค้นระนาบและความเค้นระนาบตลอดความหนา



ก) การเปลี่ยนของค่า K_C กับความหนา

ข) การเปลี่ยนของ K_C และลักษณะการแตกหักของรอยร้าวกับความหนาของอลูมิเนียมผสม 7075-T6

รูปที่ 11 อิทธิพลของความหนาที่มีต่อค่า K_C และลักษณะการแตกหักของรอยร้าว

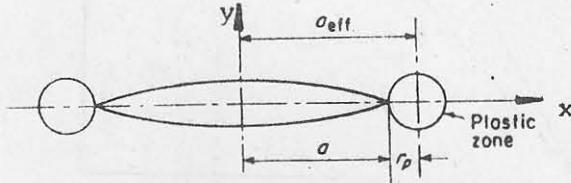
จากรูปที่ 11) จะเห็นได้ว่า ค่า K_C สำหรับกรณีความเค้นระนาบในชิ้นงานบางจะมีค่าสูง และ K_C มีค่าต่ำสุดในกรณีความเค้นระนาบในชิ้นงานหนา ค่า K_C ในกรณีความเค้นระนาบเรียกว่า SIF สำหรับความเค้นระนาบเขียนแทนด้วย K_{Ic} ค่า K_C นี้เป็นคุณสมบัติของวัสดุซึ่งมีค่าคงที่สำหรับใช้ในการออกแบบชิ้นงานตามหลักของกลศาสตร์การแตกหัก K_{Ic} มีอีกชื่อหนึ่งเรียกว่า ความต้านทานการแตกหักหรือความเหนียวต่อการแตกหัก (fracture toughness) การเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกเนื่องจากการร้าวตัวลดลงเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งเท่ากับเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของความเรียบของรอยแตกหัก $[100 \frac{x}{B}]$

บริเวณพลาสติกปลายรอยร้าวจะเป็นบริเวณกว้างที่ผิวของชิ้นงาน และมีขนาดลดลงเมื่อเข้าไปใกล้กลางแผ่นชิ้นงานเช่นดังในรูปที่ 10) ดังนั้นสำหรับชิ้นงานหนา บริเวณที่รุนแรงก็คือ บริเวณพลาสติกเล็กๆ ที่ตรงกลางความหนา ผลของบริเวณพลาสติกเล็กๆ ที่มีต่อผลการวิเคราะห์การยืดหยุ่นเชิงเส้น บริเวณปลายรอยร้าว สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มความยาวของรอยร้าวขึ้นให้รวมรัศมีของบริเวณพลาสติก r_p ด้วยดังนี้

$$a = a_{เดิม} + r_p \quad \dots 14.1)$$

$$r_p = \frac{1}{2\pi} [K_{IC} / \sigma_{yt}]^2 \quad \dots 14.2)$$

รูปที่ 12) แสดงบริเวณพลาสติกเล็กๆ ที่ปลายรอยร้าว และค่าความยาวของรอยร้าวประสิทธิผล a_{eff}



รูปที่ 12 ลักษณะของบริเวณพลาสติกปลายรอยร้าว

4.5 ขนาดการแยกตัวของรอยร้าว (Crack Opening Displacement) : COD

ทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (LEFM) ที่ได้กล่าวถึงมาแล้วใช้ได้ดีกับวัสดุที่มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยมาก สำหรับวัสดุเหนียวซึ่งเกิดมีบริเวณพลาสติกข้างหน้ารอยร้าวมาก Wells ได้เสนอแนวคิดว่าการขยายตัวของรอยร้าวอย่างไม่เสถียรเกิดขึ้น เมื่อขนาดการแยกตัวของรอยร้าวถึงค่าวิกฤตเรียกว่า COD และสมมติว่าค่า COD นี้เท่ากับทั้งในชิ้นงานจริง และชิ้นทดลองที่มีความหนาเท่ากัน ค่า COD เป็นเครื่องวัดบริเวณพลาสติกวิกฤต วิธีการที่ใช้ COD และวิธีของ LEFM จะคล้ายคลึงกันเมื่อบริเวณพลาสติกมีขนาดเล็กจริงๆ แรงแยกรอยร้าววิกฤต G_C ต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น

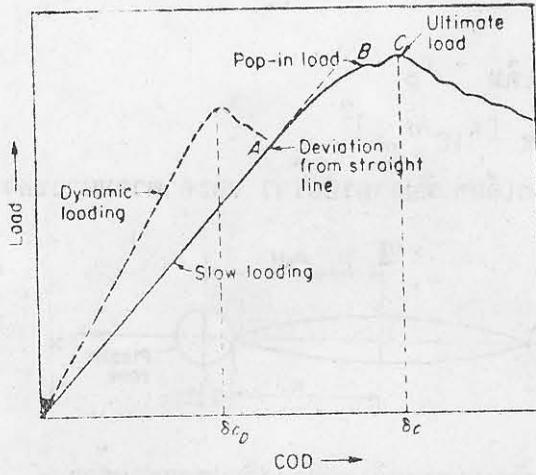
$$G_C = \sigma_{yt} \delta_C \quad \dots 15)$$

โดยที่ δ_C = ค่าการแยกตัวของรอยร้าววิกฤตหรือ COD วิกฤต
 σ_{yt} = ความเค้นครากของวัสดุ

ค่า COD วิกฤตซึ่งเกิดขึ้นขณะแตกหักหรือขณะที่รอยร้าวเริ่มขยายตัว นั้นขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกับ K_{IC} นั่นคือชนิดของวัสดุ อุณหภูมิอัตราความเครียดและอื่นๆ ค่าเหล่านี้ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัดค่าจากชิ้นทดลองที่มีรอยบาก (notch specimen) ในสภาพสิ่งแวดล้อมที่จะใช้งานเพื่อใช้เป็นหลักสำหรับเปรียบเทียบกับค่า δ_C ที่คำนวณได้จากโครงสร้างจริงๆ

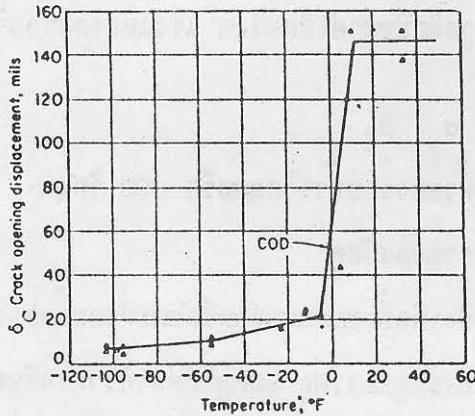
รูปที่ 13) แสดงกราฟตัวอย่างของแรงดึงและค่า COD ซึ่งมีจุดที่สำคัญ ดังนี้

- จุด A เป็นจุดที่กราฟเริ่มเบนจากเส้นตรง หรือเส้น secant modulus
- จุด B เป็นจุดที่เกิดขึ้นอย่างทันทีหรือเรียกว่า pop-in ซึ่งแสดงถึงความไม่เสถียรภาพที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด และตามด้วยการลดลงของแรงดึงและหรือการเพิ่มของค่า COD
- จุด C เป็นจุดที่ภาระมีค่าสูงสุด



รูปที่ 13 กราฟของ COD[6] กับภาระแสดงพารามิเตอร์ของการแตกหักทั้งในกรณีสถิตย์และพลวัต [10]

ปรากฏการณ์ pop-in เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ให้ค่าความต้านทานการล้า K_{IC} หรือความเหนียวสำหรับความเครียดระนาบ แต่เนื่องจากค่า CODวิกฤต δ_C ไม่อาจกำหนดได้ชัดเจนดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า COD ที่ภาระสูงสุดเป็นค่า δ_C ค่า COD วิกฤตของชิ้นงานที่รับภาระแบบพลวัต δ_{CD} จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากกรณีแบบสถิตย์ δ_C (ดูรูปที่ 13))



รูปที่ 14 การเปลี่ยนของค่า δ_C กับอุณหภูมิสำหรับเหล็ก ASTM A553 เกรด B ซึ่งมีรอยร้าวที่ผิวภายใต้แรงดึง [11]

ผลของการเปลี่ยนขนาดของ δ_C กับอุณหภูมิสำหรับเหล็ก ASTM A553 เกรด B ผสม $M_n - M_o$ ซึ่งมีรอยร้าวที่ผิวภายใต้แรงดึงแสดงดังในรูปที่ 14) เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 10 องศา ไปเป็น -5 องศา C ค่า δ_C จะลดลงประมาณ 7.3 เทา ซึ่งผลอันนี้สามารถนำเอาไปใช้เป็นหลักในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างเพื่อป้องกันการขยายตัวของรอยร้าวในกรณีความเครียดระนาบได้

เมื่อบริเวณพลาสติกขยายตัวจากปลายรอยร้าว ค่า COD ที่ปลายรอยร้าวจะมีค่าเพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับขนาดของพลาสติกตามสมการ

$$\delta = \frac{8}{\pi} \epsilon_{yt} a \ln \left[\sec \left\{ \frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_{yt}} \right\} \right] \quad \dots\dots 16)$$

โดยที่ δ = ค่า COD ที่ปลายรอยร้าว

a = ครึ่งของขนาดความยาวของรอยร้าว

σ = ขนาดของความเค้นซึ่งกระทำในทิศตั้งฉากกับรอยร้าวที่ระยะทาง ๆ

$\epsilon_{yt}, \sigma_{yt}$ = ความเครียดครากและความเค้นครากของวัสดุที่บริเวณครากปลายรอยร้าว

ถ้าความเค้นที่กระทำ σ เป็นฟังก์ชันของความเค้นคราก σ_{yt} ดังนั้นสมการที่ 16) จะมีรูปเป็น

$$\delta = \text{ค่าคงที่} \sigma_{yt} a \quad \dots\dots 17)$$

ตัวอย่าง เช่นกรณีที่มีความเค้นออกแนว $\sigma = \frac{2}{3} \sigma_{yt}$ เราจะได้ค่า COD ที่รอยร้าวยาวมีค่าเป็น

$$\delta = 1.7 \epsilon_{yt} a \quad \dots\dots 18)$$

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายวัสดุที่ปลายรอยร้าวต้องสามารถทนต่อค่า COD ตามสมการที่ 18) ได้ นั่นคือ

$$\delta_c > 1.7 \epsilon_{yt} a \quad \dots\dots 19.1)$$

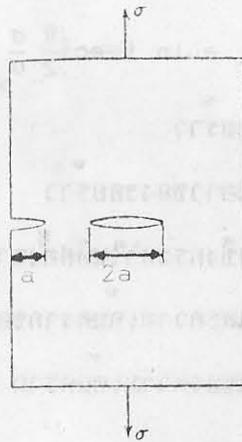
$$\text{หรือ } a_{\max} < 0.6 \frac{\delta_c}{\epsilon_{yt}} \quad \dots\dots 19.2)$$

4.6 การพิจารณาเรื่องพลังงานในการเสียหายแบบเปราะ

การเริ่มขยายตัวของรอยร้าวอย่างไม่เสถียรที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดในชิ้นงานอาจจะสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการสมดุลระหว่างพลังงานความเครียดยืดหยุ่นของชิ้นงาน δE_e ที่ลดลง และพลังงานที่ใช้ในการเกิดรอยร้าวยาวหนึ่งหน่วย ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ ก) พลังงานอิสระที่ผิวซึ่งถูกสร้างขึ้นตามการขยายตัวของรอยร้าว δS และ ข) พลังงานของการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรต่อหน่วยความยาวของรอยร้าวที่ขยายตัวเพิ่มขึ้น

$$\text{นั่นคือ } \delta E_e = \delta S + \delta W \quad \dots\dots 20)$$

Griffith ได้พิจารณาแบบจำลองของแก้วซึ่งเป็นวัสดุเปราะแท้ ๆ ที่มีรอยร้าวรูปร่างรีขนาด $2a$ อยู่ในในและความเค้นที่กระทำมีค่าคงที่ดังในรูปที่ 15) ความหนาของชิ้นงานทดลองมีค่าน้อยมากดังนั้น จึงเป็นปัญหาความเค้นระนาบ การกระจายของความเค้นสำหรับรอยร้าววงรีใช้ตาม Inglis[12] ดังนั้นเทอมต่างๆ ตามสมการที่ 20) มีค่าเป็นดังนี้



รูปที่ 15 แบบจำลองรอยร้าว
ของ Griffith

δE_e = พลังงานความเครียดยืดหยุ่นที่ลดลงต่อหน่วยความหนา

$$\delta E_e = \sigma^2 a^2 / E \quad \dots\dots ก)$$

δS = พลังงานอิสระที่ผิวต่อหน่วยความหนา

$$\delta S = 2(2a)(\gamma_s) = 4\gamma_s a \quad \dots\dots ข)$$

$\delta W = 0$ = พลังงานของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรไม่มีแทนค่าต่าง ๆ ใน 20)

$$\frac{\sigma^2 a^2}{E} = 4\gamma_s a$$

$$\therefore \text{พลังงานรวม } \Delta E = 4\gamma_s a = \frac{\sigma^2 a^2}{E} \quad \dots\dots 21)$$

ซึ่ง γ_s = พลังงานที่ผิว

Griffith ได้ให้หลักเกณฑ์ว่ารอยร้าวจะขยายตัวขณะที่มีความเค้นค่าคงที่ σ กระทำ ทำให้พลังงานอิสระที่ผิวที่เพิ่มขึ้นเท่ากับพลังงานความเครียดของชิ้นงานที่ลดลง

$$\text{นั่นคือ } \frac{\partial}{\partial a} (\Delta E) = 0 \quad \dots\dots 22)$$

แทนค่าจากสมการที่ 21) ลงใน 22) และจัดรูปใหม่เราจะได้ขนาดของรอยร้าววิกฤตเป็นดังนี้

$$a_c = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2} \quad \dots\dots 23)$$

$$\text{หรือ } a_c \sigma^2 = \frac{2E\gamma_s}{\pi} \text{ คงที่} \quad \dots\dots 24.1)$$

$$\text{และ } \sigma = \sqrt{\frac{1}{a_c}} \text{ คงที่} \quad \dots\dots 24.2)$$

ชิ้นงานที่ทำจากโลหะเปราะเมื่อเกิดการแตกหัก วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าพลังงานของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะมากกว่า ค่าพลังงานอิสระที่ผิวอยู่หลายเท่า นั่นคือ $\delta W \gg -\delta S = 0$ เงื่อนไขข้อนี้สามารถใช้ได้กับเหล็กถลุงด้วย ดังนั้นสมการที่ 20) จึง

มีรูปเป็น $\delta E_e = \delta W$ 25)

Irwin ได้คำนวณหาค่าพลังงานยืดหยุ่นที่เปลี่ยนนี้สำหรับชิ้นงานแผ่นกว้างอนันต์มีรอยร้าวทะลุตลอดความหนา รับความเค้นแกนเดียวตั้งฉากกับระนาบของรอยร้าว ได้ผลดังนี้

$$G = \pi \sigma^2 a / E$$
26)

โดยที่ G = อัตราการลดลงของพลังงานยืดหยุ่น (strain energy release rate) เป็น

$$\ln \frac{lb}{ln^2}$$

ถ้า G ในสมการที่ 26) มีค่าคงที่ สมการที่ 26) จะมีรูปเหมือนสมการที่ 24) ทุกประการนั้นคือ (จาก 26)

$$a_c \sigma^2 = \frac{GE}{\pi} = \text{คงที่}$$

หรือ $\sigma = \sqrt{\frac{GE}{\pi a_c}} = \text{คงที่} \frac{1}{\sqrt{a_c}}$ 27)

ค่าของ G เมื่อรอยร้าวเริ่มขยายตัวอย่างไม่เสถียรเรียกว่า "ค่าอัตราการลดลงของพลังงานยืดหยุ่นวิกฤต G_c " ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดความเหนียวแตกหัก (fracture toughness) หรือความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุ และทราบได้ที่ $G = G_c$ รอยร้าวก็จะขยายตัวต่อไป

ค่า G และค่าความเค้นเข้มข้น K มีความสัมพันธ์กันโดยตรงในโมด I ดังนี้คือ

ความเค้นระนาบ $G_I = \frac{1}{E} K_I^2$ 28.1)

ความเครียดระนาบ $G_I = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2$ 28.2)

ค่า G_{IC} หรือ K_{IC} มีชื่อเรียกว่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุซึ่งเป็นค่าของ G_I และ K_I กรณีความเครียดระนาบ

อย่างไรก็ดีสำหรับภาชนะของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งใช้เหล็กคาร์บอนผสมตัวอย่างเหนียว จะต้องมีความไวต่ออุณหภูมิเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องใช้ชิ้นทดสอบหนาถึง 12 in เพื่อวัดค่า K_{IC} ที่เชื่อถือได้ที่อุณหภูมิห้อง ภาชนะดังกล่าวจะได้รับรังสีนิวตรอน และการวัดอิทธิพลของมันที่มีต่อค่าความต้านทานการแตกหักของวัสดุโดยใช้ชิ้นทดสอบธรรมดาขนาดเล็ก ซึ่งไม่จำกัดการไหลของสารหล่อเย็น ดังนั้นค่า K_{IC} ที่ได้จากการทดสอบจึงใช้กับช่วงที่สนใจไม่ได้ และผลก็คือได้มีความพยายามหาค่า K_{IC} ที่ใช้การใดโดยวิธีอื่น ๆ อีกหลายวิธีเช่น

ก) วิธีพลังงานสมมูล (equivalent energy method) ของ Witt[13]

ข) วิธีพลังงานยืดหยุ่นเจ-อินทิกรัล (J-Integral) ของ Rice[14]

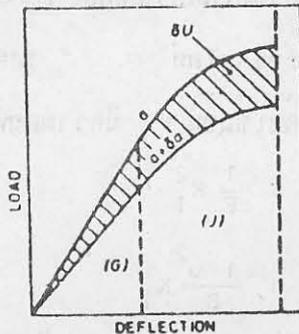
- ค) วิธีความเค้นหนาแน่นของ Irvine และ Quirk[15] และ
- ง) วิธีความเครียดใกล้ปลายรอยร้าวของ Liu[16]

4.7 การคำนวณหาค่าความต้านทานการแตกหักด้วยวิธี J-Integral

วิธีประเมินหาค่าความต้านทานการแตกหักโดยใช้ค่าความเค้นเข้มข้น (SIF), K สามารถใช้ได้ผลดีเมื่อขนาดของบริเวณพลาสติกปลายรอยร้าวมีค่าน้อยเทียบกับขนาดของชิ้นงานหรือเรียกว่าทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักสำหรับวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (LEFM) Rice ได้เสนอวิธีพลังงานยืดหยุ่น J - Integral ขึ้นมา เพื่อใช้กับกรณีที่ขนาดของบริเวณพลาสติกปลายรอยร้าวมีค่ามาก วิธีทดสอบแบบ J - Integral สามารถเอาชนะข้อจำกัดเรื่องขนาดของชิ้นทดสอบในการวัดค่า K_{IC} ได้และให้ค่าความต้านทานการแตกหักที่เที่ยงตรงโดยใช้ชิ้นงานทดสอบที่เล็กกว่าวิธี K_{IC} ปกติ คำนิยามของ J ซึ่งให้ความหมายทางกายภาพของแนวคิดที่ดีคือ

$$J = - \frac{\partial U}{\partial a} \dots\dots 29)$$

โดยที่ ∂U คือการเปลี่ยนแปลงค่าของพลังงานยืดหยุ่นต่อหน่วยความหนา ซึ่งทำให้รอยร้าวขยายตัวเพิ่มขึ้นขนาดเล็กน้อย ∂a ในชิ้นทดลอง



รูปที่ 15 โคงภาระการยืดตัว [17]

การเปลี่ยนแปลงค่าของพลังงานยืดหยุ่นสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นพื้นที่ของเส้นโค้งภาระการยืดตัว (load - displacement) ที่ลดลงซึ่งตรงกับกรณีที่รอยร้าวขยายตัวที่การยืดตัวคงที่ดังในรูปที่ 15) การเปลี่ยนแปลงของพลังงานยืดหยุ่นเป็นลบ (ลดลง) ดังนั้นค่า J ในสมการที่ 29) จึงเป็นบวก ค่า J วิกฤตในกรณีของโมด I คือ J_{IC} เมื่อการยืดตัวอย่างถาวรบริเวณปลายรอยร้าวมีค่าน้อย J ก็มีค่าเทียบเท่าหรือสมมูลกับ G ตามสมการที่ 28) ดังนี้

$$\text{ความเค้นระนาบ} \quad J_{IC} = G_{IC} = \frac{1}{E} K_{IC}^2 \dots\dots 30.1)$$

$$\text{ความเครียดระนาบ} \quad J_{IC} = G_{IC} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{IC}^2 \dots\dots 30.2)$$

สมการที่ 30) ก็คือส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟในรูปที่ 15) สำหรับวัสดุยืดหยุ่นพลาสติก J จะสูญเสียความหมายในแง่ของพลังงานศักย์ที่มีสำหรับการขยายตัวของรอยร้าวแต่ยังคงมีความสำคัญในแง่สำหรับวัดความเข้มข้นของสนามความเครียด บริเวณปลายรอยร้าวและความ

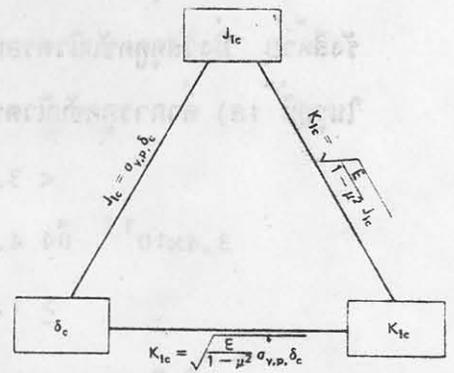
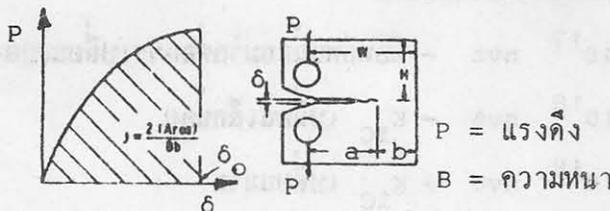
หมายของ J ในแง่ความเข้มข้นของความเครียดตัวเองที่มีความสำคัญ เพราะสามารถใช้กับชิ้นงานที่มีการยึดตัวอย่างถาวรได้มาก ค่า J_{IC} ที่วัดจากชิ้นทดสอบขนาดเล็กที่มีการยึดตัวอย่างถาวรมากก็เท่ากับค่ายึดหยุ่นเชิงเส้น G_{IC} ซึ่งวัดจากชิ้นทดสอบขนาดใหญ่ที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน

ค่า J สามารถประมาณได้จากกราฟ P- δ ดังในรูปที่ 16) ซึ่งได้จากชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ Compact Tension ขนาดเล็กได้ ค่า J จากสมการที่ 29) สำหรับกรณีชิ้นทดสอบในรูปที่ 16) ซึ่งการครากถูกจำกัดให้อยู่ในส่วนที่ไม่แตกหัก มีรูปเป็นดังนี้

$$J = \frac{2}{bB} \int_0^\delta P d\delta = \frac{2A}{bB} \dots\dots 31)$$

โดยที่ $A =$ พื้นที่ใต้กราฟ P- δ ในรูปที่ 16) ทั้งหมด

$\delta =$ การยึดตัวหรือแยกตัวของรอยบากในรูปที่ 16 ข) เนื่องจากรอยร้าวเท่านั้น ซึ่งใช้ได้ถ้า $\frac{a}{W} > 0.6$ นั่นคือมีโมเมนต์คดเป็นหลักในช่วง b และการครากจะถูกจำกัดอยู่ในช่วง b ของชิ้นทดสอบที่ยังไม่ขาด



รูปที่ 16 การหาค่า J จากกราฟ "ภาระ-การยึดตัว" ที่ได้ จากชิ้นทดสอบแบบ Compact tension [17]

รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง J_{IC} , K_{IC} และ δ_C [18]

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลักที่ใช้วัดค่าความต้านทานการแตกหักทั้งสามคือ J_{IC} , K_{IC} และ δ_C แสดงไว้ในรูปที่ 17)

4.8 อิทธิพลของสิ่งแวดลอมที่มีต่อค่าความต้านทานการแตกหัก

ความต้านทานการแตกหัก K_C หรือ G_C เป็นคุณสมบัติของวัสดุและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอิทธิพลของสิ่งแวดลอมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ สารเคมี ความชื้น การแผ่รังสี อัตราการรับภาระและอื่น ๆ

ก) อิทธิพลของอุณหภูมิ

ความต้านทานการแตกหักสำหรับโมด I (K_{IC}) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นนี้จะไม่

หาค่าการแตกหักของวัสดุจากคุณสมบัติที่ทดสอบโดยการดึง และการกระแทกที่มีอยู่ในตารางวัสดุทั่วไป

ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{IC} กับค่าความเค้น-ความเครียดดึง

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบพบว่า ค่า K_{IC} และคุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบด้วยการดึง สัมพันธ์กันตามสมการ [22]

$$K_{IC} = \frac{2}{3} E \sigma_{yt} n^2 e' \quad \dots \text{ก)}$$

โดยที่ E = โมดูลัสของความยืดหยุ่น

σ_{yt} = ความเค้นคราก

n = strain hardening exponent

e' = ความเครียดจริง

ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{IC} กับผลการทดสอบแบบ Charpy V-notch

Sailors and Corten[23] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_{IC} และพลังงานที่ดูดซับในการทดสอบแบบ Charpy V-notch ของ ferritic steel ผลการทดสอบเหล็กที่มีค่าความเค้นครากมากกว่า 100 ksi ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{yt}}\right)^2 = \frac{5}{\sigma_{yt}} \left[CVN - \frac{\sigma_{yt}}{0.2}\right] \quad \dots \text{ข)}$$

โดยที่ CVN เป็นค่าพลังงานที่ดูดซับในวัสดุเนื่องจากการทดสอบแบบ Charpy V - notch

K_{IC} และ σ_{yt} วัดที่อุณหภูมิเดียวกัน

4.10 หลักเกณฑ์สำหรับการออกแบบชิ้นงานที่มีรอยตำหนิ

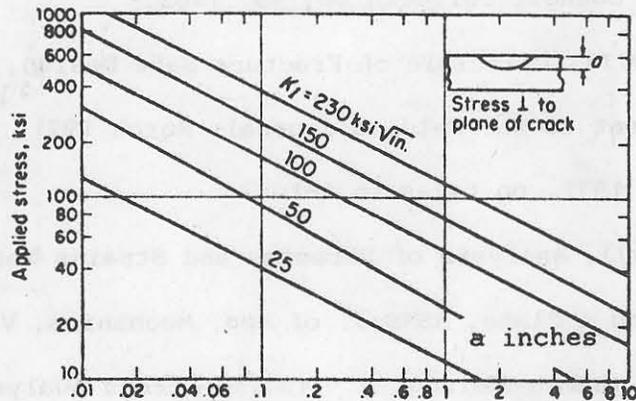
การออกแบบชิ้นงานที่มีรอยตำหนินิยมใช้หลักเกณฑ์ที่สำคัญ 2 อย่างคือ

ก) รั่วก่อนแตก (Leak-before-break) และ

ข) การประมาณขนาดของรอยตำหนิ (Defect size evaluation)

ก) วิธีรั่วก่อนแตก

หลักเกณฑ์ที่ใช้สำหรับเลือกวัสดุหรือพิถีพิถันการใช้งานของภาชนะความดันคือ "รั่วก่อนแตก" ซึ่งหลักเกณฑ์นี้ใช้หลักความจริงทางกลศาสตร์การแตกหักที่ว่า รอยร้าวที่ตรวจพบในชิ้นงานนั้น วัสดุสามารถทนอยู่ได้โดยไม่ทำให้เกิดการวิบัติอย่างใหญ่หลวงขึ้น [24, 25] ประสพการณ์จากการใช้งานจริงพบว่าภาชนะความดันผนังบางที่มีรอยร้าวทะเล (ความหนาของผนัง) ในทิศทางตั้งฉากกับความเค้นในแนวเส้นรอบวงและรอยร้าวยาวเป็นสองเท่าของความหนา จะเกิดการรั่วขึ้นโดยไม่แตกหักเสียหายแต่อย่างใด ดังนั้นถ้าเราแทนค่าขยายรอยร้าวทั้งหมดให้เท่ากับ สองเท่าของ



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง σ และ a ของรอยร้าวที่ผิวยาวรูปกึ่งวงรี [26]

5. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบชิ้นงานที่ทำด้วยโลหะซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงสูง เพื่อต้านทานการแตกหักแบบเปราะ วิธีการออกแบบที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 แบบ คือ การออกแบบโดยใช้ความเค้นใช้งานต่ำ การออกแบบโดยใช้อุณหภูมิทรานซิชัน และการออกแบบโดยใช้กลศาสตร์การแตกหัก

6. เอกสารอ้างอิง

1. Harvey, J.F. (1980), Pressure Component Construction Design and Materials Application, Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp.287-331.
2. Weck, R. (1966), Brittle Fracture of Thick-Walled Pressure Vessel, British Welding Research Assoc. Bull. 7(6), June 1966.
3. Anon (1967), Report on the Brittle Fracture of a High-Pressure Boiler Drum at Cockenzie Power Station, by the South of Scotland Electricity Board, Jan 1967, Welding Research Abroad, Welding Research Council, V. XIII No.8, Oct. 1967, New York.