เทคโนโลยียานยนต์ชั้นสูง

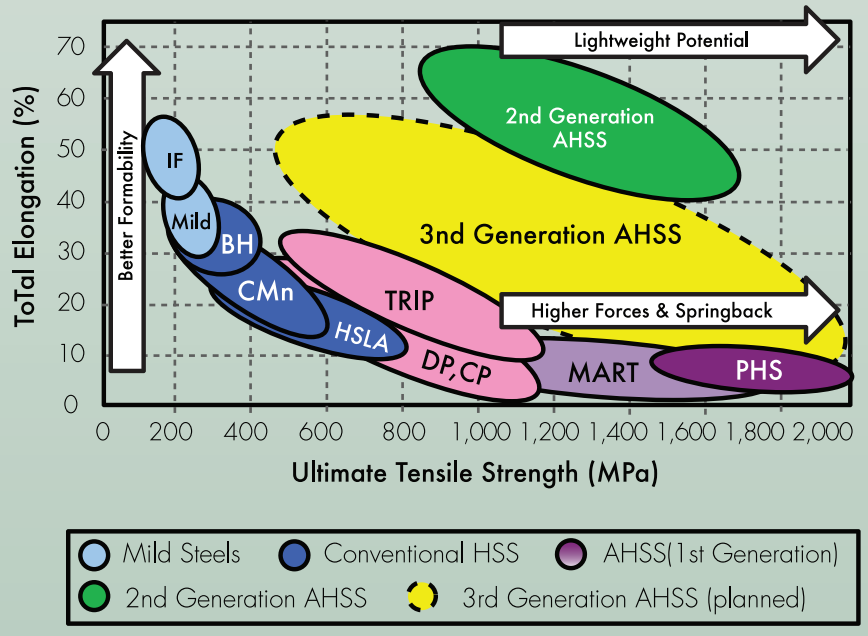
การเติบโตของการใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงในอุตสาหกรรมยานยนต์
(Growth of advanced high strength steel in automotive industry)

ศรัณยา กึ่งกลาง, รศ.ดร. วิทูร อุทัยแสงสุข

เหล็กกล้าเป็นวัสดุที่สำคัญในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์มานานกว่า 100 ปี และได้ถูกพัฒนาตั้งแต่อดีตเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นนวัตกรรมใหม่ๆทั้งในด้านโลหะวิทยา กระบวนการผลิต รวมถึงกระบวนการขึ้นรูป เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบันเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงได้ถูกวิจัยและพัฒนาจนมาถึง เจนเนอเรชั่น 3 แล้ว เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีเยี่ยม มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ เมื่อเทียบกับสมบัติทางกลที่ได้ และไม่มีปัญหาเรื่องการเชื่อมติดกับเหล็กกล้าชนิดอื่น ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 ได้ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ประเภทของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับวัสดุประเภทอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นเรื่องของการลดน้ำหนัก เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงจึงได้ถูกมุ่งพัฒนาให้มีค่าความแข็งแรงและค่าการยืดตัวที่สูงมากขึ้นพร้อมๆ กัน ดังแสดงตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปที่ 1 ที่ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้ามักเรียกว่า banana diagram



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของเหล็กกล้าประเภทต่างๆ [1]

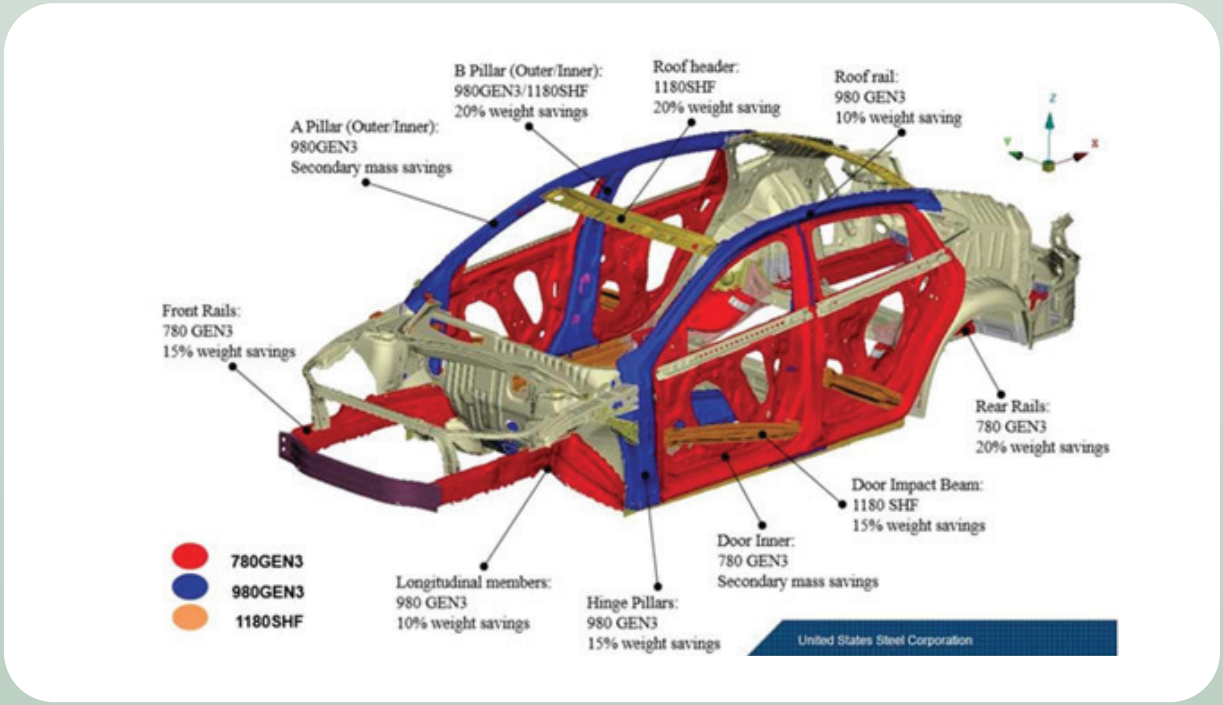
เจนเนอเรชั่นที่ 1 เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่นนี้ถูกพัฒนามาจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีการเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กด้วยการเติมอัลลอยหรือใช้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงพื้นฐานอื่นๆ เช่น การตกตะกอน (Precipitation) เหล็กกล้ากลุ่มนี้รู้จักกันในชื่อของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy steel, HSLA) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นกว่าเหล็กกล้าทั่วไปแต่ยังคงมีค่าการยืดตัวที่ต่ำ ดังนั้นเหล็กกลุ่มนี้จึงถูกพัฒนาต่อไปเป็นเหล็กกล้าสองเฟส (Dual phase steel : DP) เหล็กกล้า TRIP (Transformation-induced plasticity steel : TRIP) เหล็กกล้าหลายเฟส (Complex steel : CP) และเหล็กกล้ามาร์เทนซิติค (Martensitic steel : MS)

เจนเนอเรชั่นที่ 2 เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่นนี้คือเหล็กกล้าในกลุ่มของเหล็กกล้า TWIP (Twinning-induced plasticity steel) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติค โดยได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยการเติมอัลลอยในปริมาณที่สูง ทำให้ความแข็งแรงและการยืดตัวของเหล็กเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามเหล็กกล้ากลุ่มนี้ยังไม่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์อย่างแพร่หลายนัก เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูงและยากต่อการเชื่อมติดกับเหล็กเกรดอื่น

เจนเนอเรชั่นที่ 3 เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่นนี้ถูกพัฒนาให้มีความแข็งแรงและการยืดตัวที่สูงโดยพิจารณาถึงเรื่องต้นทุนราคาของอัลลอยและการเชื่อมติดกับเหล็กเกรดอื่นด้วย การใช้เหล็กกล้ากลุ่มนี้จะส่งผลให้ในอนาคตสามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีปัญหาในการขึ้นรูปน้อยลง รวมถึงการลดน้ำหนักของโครงสร้างรถได้อย่างมาก โดยอาจทำได้ด้วยการปรับเปลี่ยนรูปร่างให้รับแรงได้มากขึ้นและลดความหนาของชิ้นส่วนลงในเวลาเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้การใช้เหล็กกล้ากลุ่มนี้แพร่หลายมากขึ้นผู้ผลิตเหล็กกล้ายังคงต้องพัฒนาเทคนิคต่างๆต่อไปเพื่อนำมาใช้ในการผลิต ตั้งแต่การลดปริมาณส่วนผสมทางเคมีไปจนถึงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพทางความร้อนการทำ (Heat treatment) แบบใหม่ๆ

การใช้งาน

ในอุตสาหกรรมยานยนต์เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 นี้นิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างรับแรงดังแสดงในรูปที่ 2 คือ ชิ้นส่วน front rails, A pillar, B pillar และ rear rail ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนและจำเป็นต้องขึ้นรูปให้ได้ตามแบบอย่างแม่นยำเพื่อให้สามารถคงสมรรถภาพต่างๆของชิ้นส่วนนั้นๆไว้ได้ เช่น ความแกร่ง ความสามารถในการรับแรง และการดูดซับพลังงานจากการกระแทก เป็นต้น ดังนั้น เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 จึงเป็นเหล็กกล้าที่เหมาะสมกับความต้องการดังกล่าว

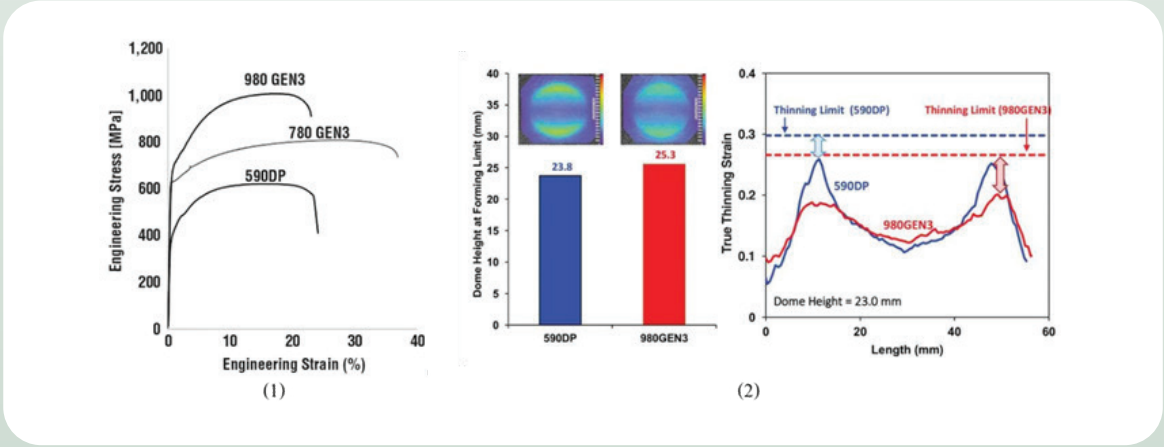


รูปที่ 2 โครงสร้างรับแรงในตัวถังรถยนต์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง [2]

วิธีการประเมินพฤติกรรมวัสดุของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมวัสดุเป็นกุญแจสำคัญในการนำเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาใช้ ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตเหล็กจึงไม่เพียงแค่พัฒนาเหล็กกล้าประเภทใหม่ๆเท่านั้นแต่ในขณะเดียวกันก็ยังได้นำเสนอวิธีการประเมินพฤติกรรมวัสดุที่เหมาะสมเพื่อช่วยสำหรับวิเคราะห์การขึ้นรูปเหล็กกล้าเจนเนอเรชั่นใหม่ๆ อีกด้วย ซึ่งวิธีการต่างๆดังกล่าวสามารถอธิบายคร่าวๆ ได้ดังนี้

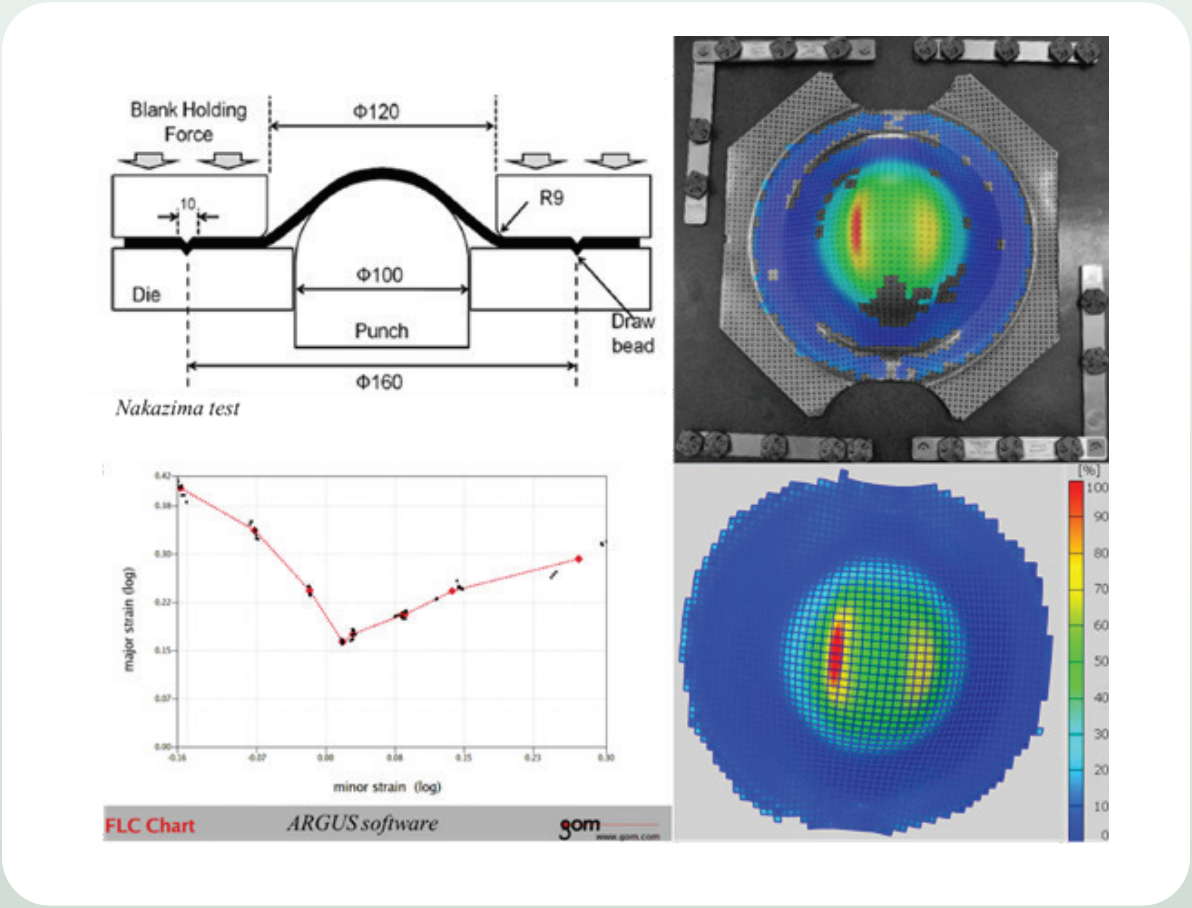
การวัดความสามารถในการขึนรูปโดยรวมของวัสดุ (Global formability) วิธีการนี้เป็นการประเมินความสามารถของวัสดุในการลากขึ้นรูปลึก เมื่อวัสดุถูกขึ้นรูปเกินขีดจำกัดนี้ จะทำให้ความหนาของชิ้นงานลดลง เกิดการคอดตัวและการฉีกขาดเสียหาย ซึ่งโดยปกติแล้วความสามารถในการขึ้นรูปโดยรวมของวัสดุสามารถวิเคราะห์ได้ด้วย แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming limit diagram, FLD) แผนภาพนี้จะประเมินผลการกระจายตัวของค่าความเครียดในแนวระนาบของเหล็กแผ่นในระหว่างการขึ้นรูป ตัวอย่างผลการกระจายตัวของค่าความเครียดหลังการขึ้นรูปของเหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 เกรด 780 เทียบกับของเหล็กกล้าสองเฟสเกรด 590 ทั่วไป แสดงในรูปที่ 3(2) จะเห็นได้ว่าเหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 ให้การกระจายตัวของค่าความเครียดของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปที่สม่ำเสมอมากกว่าเหล็กกล้าสองเฟสที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน จึงทำให้เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 เกรด 780 มีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่าเหล็กกล้าสองเฟสเกรด 590 แม้ว่าเหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 เกรด 780 จะมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าสองเฟสเกรด 590 ดังแสดงในรูปที่ 3(1)



รูปที่ 3 (1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด (2) การกระจายตัวของค่าความเครียดของเหล็กกล้าเจนเนอเรชั่น 3 เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าสองเฟสแบบเดิม [2]

ในปัจจุบันการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กแผ่นสามารถทำได้โดยการจำลองการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite Element: FE simulation) ร่วมกับแผนภาพ FLD แต่แผนภาพ FLD ที่มีใช้ในโปรแกรม FE เฉพาะทางส่วนใหญ่จะถูกสร้างจากการสมการของ Keeler [3] ซึ่งอาศัยเพียงค่า n-value และความหนาของวัสดุเท่านั้น ค่า n-value เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการแข็งตัวขึ้นของโลหะ สามารถหาได้จากกราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุ จึงทำให้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปเหล่านี้ไม่สามารถทำนายขอบเขตการขึ้นรูปของเหล็กกล้าเกรดใหม่ๆได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้ได้แผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูปของเหล็กกล้าที่ถูกต้องมากขึ้นจึงต้องทดสอบวัสดุโลหะแผ่นนั้นๆด้วยการทดสอบการขึ้นรูปแบบ Nakazima ดังแสดงในรูปที่ 4 และวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์เฉพาะทาง จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาสร้างเป็นแผนภาพ FLD ขึ้น

การดีดตัวกลับของชิ้นงาน (Springback) เหล็กกล้าเจนเนอเรชั่นนี้ถูกพัฒนามาจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีการเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กด้วยการเติมอัลลอยหรือใช้กลไกการเพิ่มความแข็งแรงพื้นฐานอื่นๆ เช่น การตกตะกอน (Precipitation) เหล็กกล้ากลุ่มนี้รู้จักกันในชื่อของเหล็กกล้าผสมต่ำความแข็งแรงสูง (High strength low alloy steel, HSLA) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นกว่าเหล็กกล้าทั่วไปแต่ยังคงมีค่าการยืดตัวที่ต่ำ ดังนั้นเหล็กกลุ่มนี้จึงถูกพัฒนาต่อไปเป็นเหล็กกล้าสองเฟส (Dual phase steel : DP) เหล็กกล้า TRIP (Transformation-induced plasticity steel : TRIP) เหล็กกล้าหลายเฟส (Complex steel : CP) และเหล็กกล้ามาร์เทนซิติค (Martensitic steel : MS)

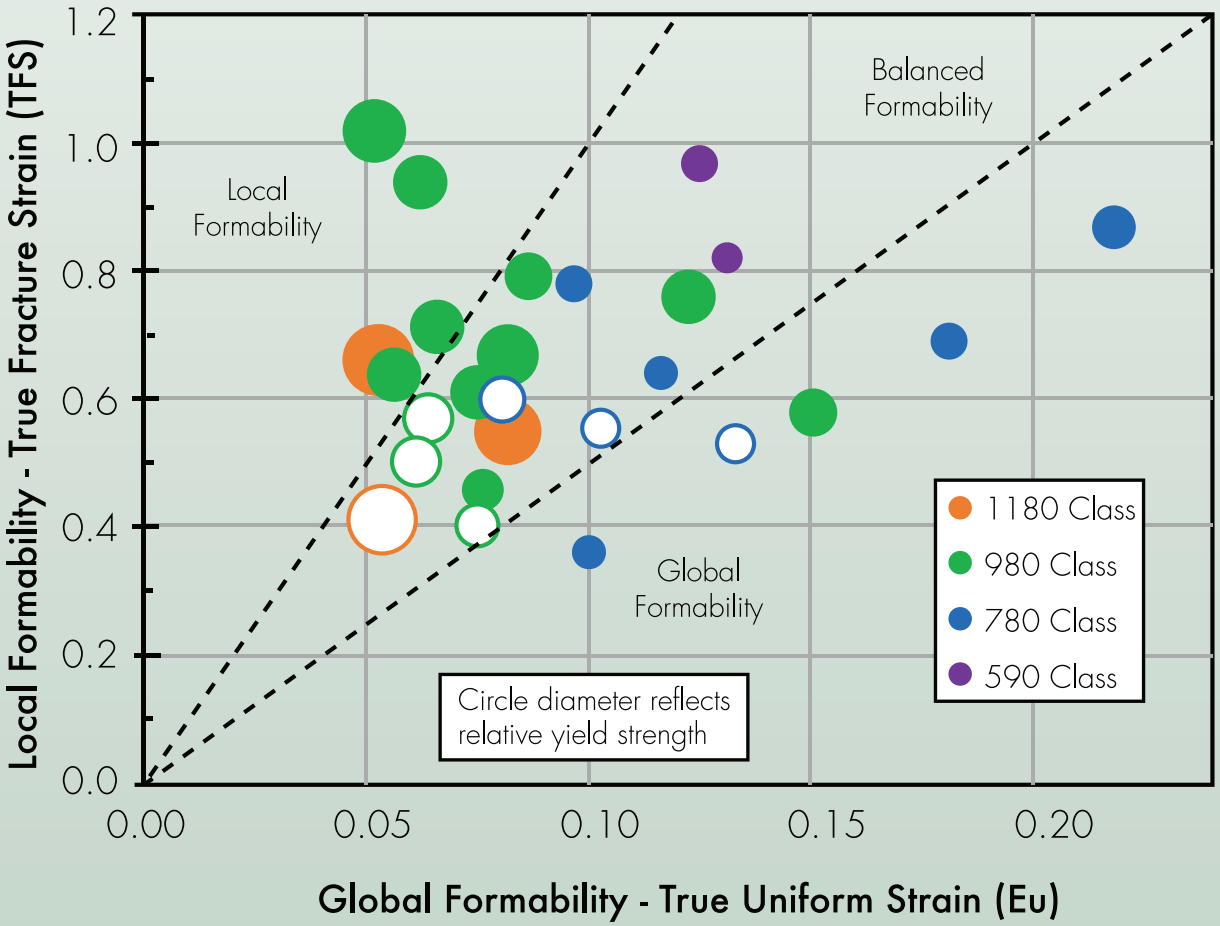


รูปที่ 4 การทดสอบ Nakazima และการสร้างแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป
โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปของวัสดุ

การวัดความสามารถในการขึนรูปเฉพาะจุดของวัสดุ (Local formability) วิธีการนี้ใช้สำหรับการประเมินความสามารถในการต้านทานการฉีกขาดที่ขอบของวัสดุ ซึ่งสามารถทำได้โดยการทดสอบขยายรู (Hole expansion test) การทดสอบนี้เป็นการขึ้นรูปด้วยการกด punch รูปทรงกรวยผ่านรูของชิ้นงานที่เตรียมไว้ก่อนจนกระทั่งเกิดรอยแตกขึ้นบนบริเวณขอบรู จากนั้นจึงวัดการขยายขนาดของรูโดยการคำนวณจากการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูจนถึงจุดก่อนเกิดรอยแตกขึ้น ถ้าค่าการขยายขนาดรูมีค่าสูงแสดงว่าวัสดุมีความสามารถในการขึ้นรูปเฉพาะจุดที่สูง นอกจากนี้ค่าความสามารถนี้ของวัสดุสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มความแข็งที่ขอบตัดในขั้นตอนของการตัดชิ้นงาน เช่นการวางตำแหน่งของดายสำหรับตัดที่เหมาะสม การกำหนดค่า die clearance การวางมุมการตัดเฉือน รูปร่างของ punch อย่างไรก็ตาม การทดสอบขยายรูเป็นการทดสอบที่ง่ายแต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ค่อนข้างมาก วิธีการที่ 2 สำหรับการประเมินความสามารถในการขึ้นรูปเฉพาะจุดของวัสดุ คือการวัดค่าความเครียดจริง ณ จุดแตกหักของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่มีความแน่นอนมากกว่า โดยวิธีการนี้จะใช้ชิ้นงานทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานการแตกหักของวัสดุหลังเกิดการคอดตัว

ความสามารถในการดัดขึนรูป (Bendability) เป็นหนึ่งในค่าที่สำคัญสำหรับการประเมินพฤติกรรมการขึ้นรูปของวัสดุ โดยจะพิจารณาความสามารถในการขึ้นรูปโดยรวมและความสามารถในการขึ้นรูปเฉพาะจุดของวัสดุไว้ด้วยกัน **ความสามารถในการดัดภายใต้แรงดึง (Stretch bendability)** สามารถใช้ประเมินความสามารถของวัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรัศมีขนาดเล็กๆได้ ซึ่งคล้ายคลึงกับการดึงวัสดุผ่าน draw bead ของแม่พิมพ์ ค่าความสามารถในการดัดภายใต้แรงดึงจะใช้สำหรับการประเมินขอบเขตการขึ้นรูปในบริเวณที่มีรัศมีเล็กๆและใช้ในการออกแบบรูปร่างของ bead เพื่อควบคุมการดึดตัวกลับของชิ้นงานได้

แผนภาพฮานซ์ (Hance diagram) เป็นเครื่องมือใหม่ที่ใช้สำหรับการประเมินการขึ้นรูปของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง โดยข้อมูลในแผนภาพฮานซ์เป็นข้อมูลที่ผสมผสานระหว่างค่าการยืดตัวสม่ำเสมอ (Uniform elongation) และค่าความเครียดแตกหัก (Fracture elongation) ของวัสดุเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 แผนภาพนี้จะช่วยในการเลือกใช้เหล็กกล้าเกรดต่างๆให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปและยังสามารถช่วยแก้ไขปัญหาในการออกแบบแม่พิมพ์ โดยถ้าชิ้นงานเกิดการแตกของขอบชิ้นงาน ควรเลือกวัสดุที่อยู่ในตำแหน่งที่สูงขึ้นในแผนภาพ แต่ถ้าเกิดปัญหาเกี่ยวกับการคอดตัวหรือการลดลงของความหนาของชิ้นงานสามารถแก้ไขได้โดยเลือกใช้วัสดุที่มีตำแหน่งไปทางขวามือของแผนภาพมากขึ้น



รูปที่ 5 ตัวอย่างแผนภาพฮานซ์ [2]

แหล่งที่มา :

[1] E. Billur and T. Altan, "Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I", Stamping Journal, 2013

[2] T. Fiorelli, S. Modi, B. Smith, and A. Spulber, "Technology Roadmaps: Intelligent Mobility Technology, Materials and Manufacturing Processes, and Light-Duty Vehicle Propulsion", Ann Arbor, Mich.: Center for Automotive Research, 2017

[3] S. Keller and M. Kinchi, "Advanced high strength steel application guidelines version 6.0", WorldAutoSteel