



การทดสอบทางดิจิทัลกับอิทธิพลของความดันภายในสำหรับ การผลิตชิ้นส่วนลักษณะท่อโดยการขึ้นรูปด้วยของเหลว

A Digital Tryout on Effects of Internal Pressure for Manufacturing a Tubular Part by Hydroforming

ทวีภัทร บุรณชิตี

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก ในชิ้นส่วนเหล่านั้นมีชิ้นส่วนจำนวนมากที่มีลักษณะเป็นท่อ ในการออกแบบกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมสามารถรักษาความสามารถในการแข่งขันในตลาดได้ จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อทำการทดสอบทางดิจิทัลที่เหมาะสมทดแทนการทดลองจริงที่สิ้นเปลืองทั้งเวลา ทรัพยากร และต้นทุนเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้ทำการทดสอบทางดิจิทัลกับอิทธิพลของความดันภายในต่อกระบวนการผลิตชิ้นส่วนลักษณะท่อ ด้วยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น เพื่อการจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปด้วยของเหลว นอกจากนี้เนื่องจากท่อมี่ลักษณะเป็นโครงสร้างผนังบาง จึงได้นำเอาแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูปและการกระจายตัวความหนาของชิ้นส่วนบนหน้าตัดที่สำคัญมาใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายจากการขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าความควบคุมความดันของของเหลวในการขึ้นรูปมีความสำคัญมากต่อความสามารถในการขึ้นรูปของกระบวนการ และการทดสอบทางดิจิทัลนั้นสามารถเร่งขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การขึ้นรูปด้วยของเหลว; การทดสอบทางด้านดิจิทัล; การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

ABSTRACT

Currently, automobile parts industry is a very important sector to Thailand's economy. Within those parts produced, many parts are tubular structures. In manufacturing process design of these parts to maintain the competitiveness of the industrial sector in the market, a digital tryout through a construction of computer simulations needs to be properly implemented to replace physical tryouts requiring much time, resource and cost. This research conducts a digital test on internal pressure effects via a nonlinear finite element method to simulate a Hydroforming process. In addition, since the tubular parts are thin-walled structures, forming limit diagram (FLD) and thickness distribution of a section of interest are used in the failure analysis from the forming. This study found that the control of the forming pressure plays an important role to the formability of the hydroforming process and the digital tryout can well accelerate the design and development phase.

Keywords: Hydroforming; Digital Tryout; Nonlinear Finite Element Analysis

1. บทนำ

ความสามารถในการผลิตสินค้าถือว่าเป็นตัวดัชนีชี้วัด (Key Performance Index หรือ KPI) ที่สำคัญตัวหนึ่งซึ่งชี้ให้เห็นถึงความเจริญก้าวหน้าของประเทศนั้นๆ ทั้งนี้ภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ (Automobile Part Industry) เป็นหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทยเป็นอย่างมาก ซึ่งการจะให้ภาคอุตสาหกรรมมีผลิตผล (Productivity) ที่สูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางการออกแบบและผลิตที่มีศักยภาพสูง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และต้นทุนที่สามารถแข่งขันในสภาวะตลาดปัจจุบันได้ ทั้งนี้กระบวนการผลิตที่มีศักยภาพสูงในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แบบหนึ่ง คือ การขึ้นรูปด้วยของเหลว (Hydroforming หรือ HF) ทั้งนี้รูปร่างชิ้นส่วนยานยนต์ที่เหมาะสมต่อการนำเอา HF มาประยุกต์ใช้ คือ ชิ้นส่วนที่มีรูปร่างเป็นท่อ (Tubular Parts) ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างยานยนต์จำนวนมากในปัจจุบันก็มีลักษณะเป็นท่อหรือโครงสร้างผนังบาง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1 ซึ่ง Hartl (2005) ทบทวนการผลิตชิ้นส่วนหลายๆชิ้นที่ผลิตโดยนำเอา HF มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ขณะเดียวกัน Oh *et al.* (2006) ได้เน้นนำเสนอการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

(a)



(b)



(c)

รูปที่ 1 ชิ้นส่วนที่สามารถผลิตโดยวิธีการขึ้นรูปด้วยของเหลว รูป (a) – (b) จาก Hart (2005) รูป (c) จาก Oh *et al.* (2006)

ทั้งนี้ Oh *et al.* (2006) กล่าวว่า HF มีข้อได้เปรียบทางด้านความแข็งแรงของชิ้นส่วนที่สูงขึ้น คุณภาพดีขึ้น น้ำหนักลดลง และ ต้นทุนเครื่องมือแม่พิมพ์น้อยลง Dohmann and Hartl (1996) เสนอว่า HF เป็นวิธีหนึ่งในการผลิตชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักน้อย และจัดว่าเป็นเทคโนโลยีที่ยังมีอายุน้อยในขณะนั้น กระบวนการผลิตมีจุดมุ่งหมายในอุดมคติหลักๆ อยู่ 2 ประการ คือ (1) ได้ท่อที่มีรูปร่างตามช่องว่างของแม่พิมพ์ และ (2) ได้ความหนาของท่อสม่ำเสมอ นอกจากนี้ Koc *et al.* (2000) ได้นำเอาการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) และการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ผ่านแบบจำลองพหุนามกำลังสอง (Quadratic Polynomials) มาใช้ประกอบเสนอแนวทางการผลิตชิ้นส่วนข้อต่อตัวที (T) โดยกระบวนการ HF นอกจากนี้ Xia (2001) นำเสนอแบบจำลองเชิงวิเคราะห์แบบหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์ความล้าเหลวในการขึ้นรูปชิ้นส่วนอย่างง่ายจากวิธี HF ส่วน Nyuyen *et al.* (2003) ได้นำเสนอแนวทางการนำเอาวิธีย้อนกลับ (Inverse Approach หรือ IA) ซึ่งเป็นลักษณะแบบเดียวกับที่ใช้ใน Buranathiti and Cao (2007) มาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการ HF สำหรับชิ้นส่วนท่อในกรณีศึกษาอย่างง่ายแบบหนึ่ง

บทความนี้ได้นำเสนอการขึ้นรูปด้วยของเหลว (HF) ตามด้วยกรณีศึกษาที่ใช้ในบทความนี้ เพื่อประกอบการ

นำเสนอ ผลการวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ ปิดท้ายด้วยอภิปรายและหมายเหตุสรุปที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตนี้

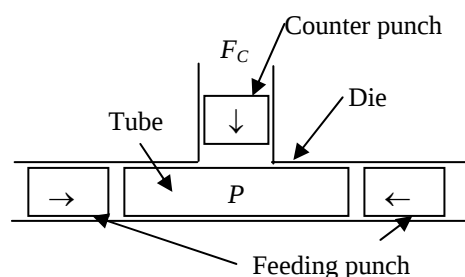
2. การขึ้นรูปด้วยของเหลว

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ทำจากโลหะส่วนใหญ่มาจากการขึ้นรูปวัสดุที่มาจากรูปร่างพื้นฐาน เช่น แผ่น ท่อ เป็นต้น ให้มีรูปร่างที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น (Value-added Configuration) ซึ่งเป็นการแปรรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) ทั้งนี้การขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นท่อ มีความท้าทายแตกต่างจากชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นโลหะแผ่นทั่วไป ซึ่งสามารถใช้วิธีการปั๊มขึ้นรูป (Stamping) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ (Efficient) สูงในการผลิต แต่วิธีการปั๊มขึ้นรูปนี้ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในการผลิตชิ้นส่วนท่อ อีกทั้งการใส่ภาระกรรมเพื่อการขึ้นรูปชิ้นส่วนท่อนี้ๆ มักมีปัญหาการเกิดรอยย่น (Wrinkling) จากปรากฏการณ์โก่ง (Buckling) ซึ่งแนวทางแก้ไขหนึ่ง คือ การใส่แมนเดรล (Mandrel) หรือแกนใน แต่ก็เป็นการเพิ่มต้นทุนทางด้านเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำสูงของแต่ละผลิตภัณฑ์ให้กับกระบวนการผลิตอีกต่อหนึ่ง ดังนั้น ถ้าทำให้แมนเดรลเป็นวัสดุที่สามารถปรับเปลี่ยนรองรับรูปร่างต่างๆ ได้ ก็จะเป็นการทำให้กระบวนการผลิตมีความยืดหยุ่นสามารถตอบสนองต่อความเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของชิ้นงานตามสภาวะตลาดได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงได้มีการนำแนวความคิดของแรงดันของเหลว (Hydraulic Pressure) มาใช้ โดยกระบวนการผลิตนี้สามารถรวมเรียกว่า การขึ้นรูปด้วยของเหลว (Hydroforming หรือ HF) โดยได้แสดงแผนผังส่วนประกอบของการผลิตชนิดนี้พอสังเขปในรูปที่ 2 โดยที่วิธีการขึ้นรูปด้วยของเหลวนี้นี้มีข้อดีหลายประการเมื่อได้นำมาเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปด้วยระเบิด (Explosive Forming) ซึ่งถือว่าการขึ้นรูปที่มีการใช้อัตราพลังงานสูง (High-energy Rate Forming) แบบหนึ่ง [Amstead *et al.*, 1986]

การแปรรูปของวัสดุในกรณีนี้ จะได้เน้นพฤติกรรมด้านพลาสติกของวัสดุ โดยในบทความนี้ใช้สมการของ Hollomon แสดงเส้นการไหล (Flow Curve) ของวัสดุดังนี้

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

โดยที่ σ คือ ค่าความเค้นจริง (True Stress) ε คือ ค่าความเครียดจริง (True Strain) K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient) และ n คือ ค่ายกกำลังความแข็ง (Hardening Exponent)



รูปที่ 2 แผนผังส่วนประกอบของการขึ้นรูปด้วยของเหลว (Hydroforming)

การเลือกใช้ความดันภายในท่อในเบื้องต้นสามารถทำการประมาณได้ โดยใช้สมการความสมดุลของความเค้นในท่อ ดังนี้

$$\sigma = \frac{PD}{2t} \quad (2)$$

โดยที่ D เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ, P เป็นค่าความดันภายในท่อ, t เป็นค่าความหนาของท่อ และ σ เป็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่จะได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้

3. กรณีศึกษา

บทความนี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตชิ้นส่วนข้อต่อรูปตัวที (Tee-shaped Joint) ที่มีลักษณะคล้ายกับชิ้นส่วนที่แสดงในรูป 1(b) ซึ่งถือได้ว่าเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานที่ผลิตจากกระบวนการขึ้นรูปด้วยของเหลว

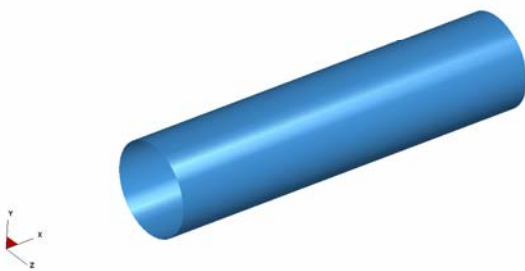
ท่อโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้ มาจากเหล็กกล้าแบบละมุนรีดร้อน (Hot Rolled Mild Steel หรือ HRCQ) ที่มีค่าความหนาแน่น (ρ) เป็น 7850.0 kg/m³, โมดูลัส

ยืดหยุ่น (E) เป็น 207.0 GPa, อัตราส่วนปัวซอง (ν) เป็น 0.28, พฤติกรรมทางด้านพลาสติกให้เป็นตามสมการของ Hollomon ในสมการที่ (1) ค่า K เป็น 543 MPa, ค่า n เป็น 0.21, ค่าตัวแปรความไม่เป็นทิศทางเดียวกัน (Anisotropy Ratio หรือ R) เป็น 0.99 และตัวยกกำลังของฟังก์ชันคราก (Yield Function) ของ Barlat (m) เป็น 6.0

รูปร่างเริ่มต้นท่อโลหะที่ใช้ในการศึกษานี้ แสดงในรูปที่ 3 กำหนดให้มีความหนาเริ่มต้นที่ 1.0 mm, รัศมีท่อ 25.0 mm, ท่อยาว 200.0 mm และมีความสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Coefficient หรือ μ) อยู่ที่ 0.125 ทั้งนี้ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการจำลองท่อ คือ เอลิเมนต์โครงสร้างแบบเปลือก (Shell Element) ตามแบบของ Belytschko *et al.* (1984) ที่มีจำนวนจุดการอินทิเกรต (Number of Integration Points, NIP) อยู่ 5 จุด เนื่องจากการวิเคราะห์นี้ไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากการสปริงตัวกลับ (Springback) จึงไม่ได้ใช้ 7 จุดอินทิเกรตตามแนวความหนา ดังที่แนะนำใน ทวิภัทร์ และอาณัติ (2549) กำหนดให้ค่าตัวแปรแก้ไขความเฉือน (Shear Correction Factor) อยู่ที่ 0.833 กำหนดให้มีการแบ่งเอลิเมนต์ตามสภาวะการฉีก (Adaptive Meshing) ได้สูงสุด 3 ระดับ หรือเล็กลงด้านละประมาณ 1/8 หรือ 1/64 ของพื้นที่เริ่มต้น

ตัวโปรแกรมการคำนวณที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ Dynaform และ LS-DYNA โดยการวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) นี้ จะไม่พิจารณาผลกระทบจากการสปริงตัวกลับ

TUBULAR HYDROFORMING
STEP 1 TIME: 0.000000



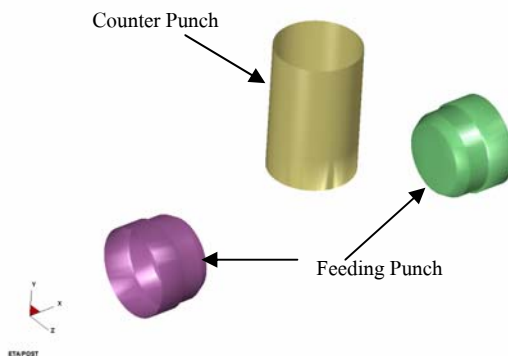
รูปที่ 3 ตัวท่อที่เป็นชิ้นส่วนวัตถุดิบ

TUBULAR HYDROFORMING
STEP 1 TIME: 0.000000



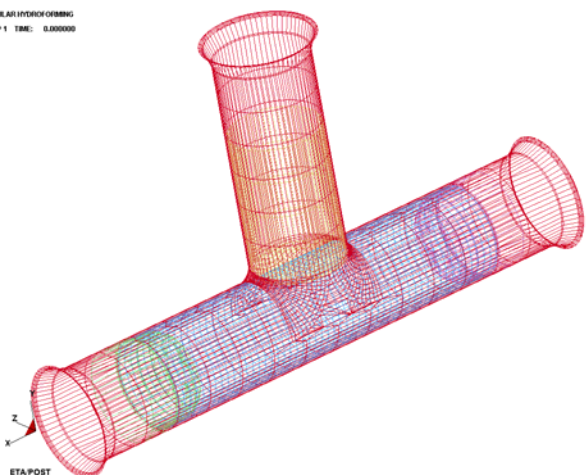
รูปที่ 4 แม่พิมพ์ที่ไม่เคลื่อนที่

TUBULAR HYDROFORMING
STEP 1 TIME: 0.000000



รูปที่ 5 ส่วนประกอบแม่พิมพ์ที่เคลื่อนไหว

TUBULAR HYDROFORMING
STEP 1 TIME: 0.000000



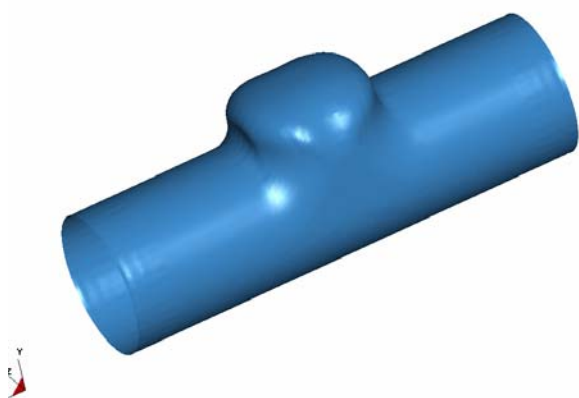
รูปที่ 6 โครงข่ายของไฟไนต์เอลิเมนต์ในบทความนี้

เวลาเสมือน (Virtual Time) ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปนี้ตั้งไว้ที่ 0.040 วินาที ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ต่างๆ กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ดังแสดงแม่พิมพ์ที่ไม่เคลื่อนที่ในรูปที่ 4 โดยให้แม่พิมพ์ป้อนเข้า (Feeding Punch) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 500 mm/s กำหนดให้แม่พิมพ์ด้านขึ้นบน (Counter Punch) ถูกกดด้วยแรง (F_C) 1,000 N โดยแสดงแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่ตามเงื่อนไขข้างต้นในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงโครงข่าย (Mesh) ของไฟไนต์เอลิเมนต์ขององค์ประกอบหลักในการจำลองสถานการณ์ของกระบวนการขึ้นรูปนี้

ในการศึกษานี้ ได้ปรับเปลี่ยนตัวแปรออกแบบที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ โดยที่ตัวแปรหลักคือ ค่าความดันของของเหลว ทั้งนี้ดัชนีชี้วัด (KPI) ที่สำคัญ คือ การเกิดรอยขุ่น (Wrinkling) การฉีกขาด (Tearing) และการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงาน

4. ผลการวิเคราะห์

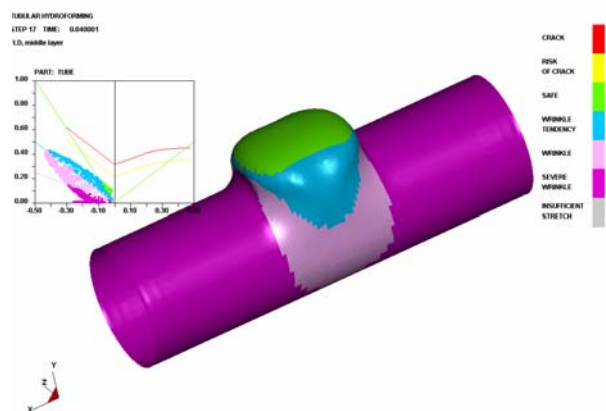
จากกรณีศึกษาดังที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้น ภายหลังจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น จะสามารถเห็น การแปรรูปในระดับมหภาค (Macro scale) ผ่านการขจัด (Displacement) ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นกรณีตัวอย่างการขึ้นรูปที่ความดันภายใน 12.0 MPa



รูปที่ 7 รูปร่างของชิ้นส่วนหลังจากการขึ้นรูปด้วย HF ที่ $P = 12.0$ MPa

แต่เนื่องจากการแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปการขจัดนั้นยากต่อการนำไปวิเคราะห์และหาข้อสรุปต่อไป จึงได้

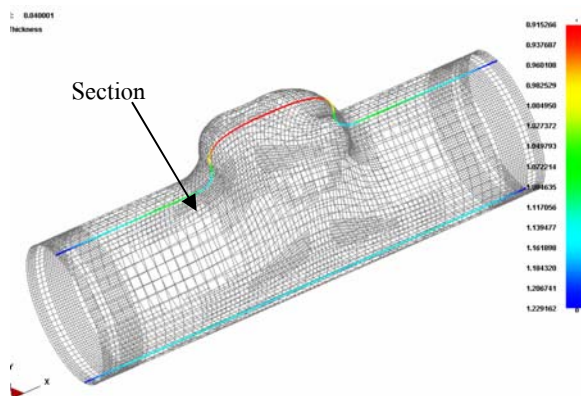
นำเอาแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram หรือ FLD) ซึ่งริเริ่มใช้ตั้งแต่งานของ Keeler and Backofen (1964) โดยแสดงความเครียดหลัก (Principal Strain) ของแต่ละเอลิเมนต์ของชิ้นส่วนผนังบาง มาใช้แสดงกรณีตัวอย่างในรูปที่ 8 โดยพบว่ากรณีดังกล่าวไม่มีแนวโน้มว่าชิ้นงานจะฉีกขาด จากการที่ทุกเอลิเมนต์อยู่ใต้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve หรือ FLC) อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่ชิ้นงานจะเกิดรอยขุ่นขึ้น ดังเห็นได้ว่ามีเอลิเมนต์จำนวนมากมีสถานะความเครียดหลักอยู่ใน Quarter ที่ 2 ของ FLD



รูปที่ 8 ความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นส่วนด้วย HF ที่ $P = 12.0$ MPa

เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของความดันภายใน (P) ของของเหลวภายในท่อ จึงได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความดันในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยยังคงค่าตัวแปรอื่นๆ ทั้งหมดเอาไว้ โดยแผนการวิเคราะห์นี้รวบรวมแสดงในตารางที่ 1 ประกอบกับค่าความหนาสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จากการทดลองทางดิจิทัลด้วย FEA นี้

อย่างไรก็ตามแม้ว่าชิ้นส่วนที่ได้จากเงื่อนไขใดๆ ของ HF อาจจะไม่ฉีกขาด แต่การกระจายตัวของความหนาของชิ้นส่วน ก็อาจจะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (Significant Impact) ต่อความแข็งแรงทางด้านโครงสร้าง (Structural Integrity) การศึกษานี้จึงตัดหน้าตัดตามแนวแกนท่อผ่านสันที่นูนขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การกระจายตัวของความหนาของหน้าตัดที่นำมาวิเคราะห์ HF ที่ $P = 12.0$ MPa

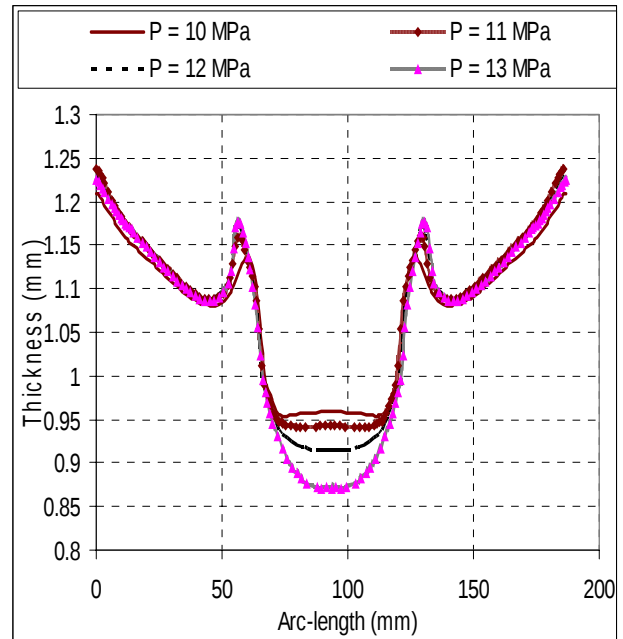
ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์การขึ้นรูปเมื่อเปลี่ยนความดัน (P)

P (MPa)	Min. t (mm)	Max. t (mm)	Status
1.0	1.008	1.629	Fail
4.0	0.992	1.389	Fail
7.0	0.97	1.406	Fail
10.0	0.953	1.2099	Fail
11.0	0.94	1.238	Pass
12.0	0.915	1.229	Pass
13.0	0.8714	1.225	Pass
15.0	0.678	1.22	Fail
17.0*	0.8096	1.222	Pass

* หมายถึงมีการควบคุมความดันตามเวลา (ไม่คงที่)

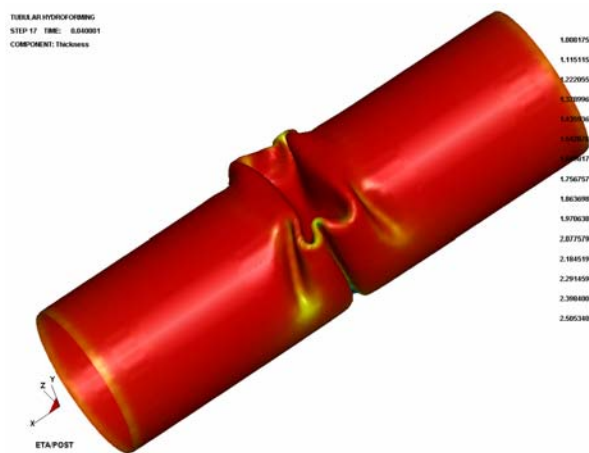
จากตารางที่ 1 ความหมายของ Status ที่ผ่าน (Pass) หรือที่ล้มเหลว (Fail) มาจากการฉีกขาด (Tearing) หรือการเกิดรอยย่น (Wrinkling) ภายใต้งานของ FLD สามารถเห็นได้ว่าความดันภายใน (P) มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถในการขึ้นรูป สำหรับที่ $P = 17.0$ MPa นั้น มีการควบคุมความดันให้สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของแม่พิมพ์ที่เคลื่อนไหว (ไม่คงที่ตลอดกระบวนการขึ้นรูป) ทำให้ชิ้นส่วนสามารถขึ้นรูปได้ ส่วนในกรณีอื่นๆนั้นได้กำหนดค่าให้มีความดันสม่ำเสมอคงที่ตลอดกระบวนการขึ้นรูป

รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของความหนาตลอดหน้าตัดที่แสดงในรูปที่ 9 ในกรณีความดันที่ 10.0, 11.0, 12.0, และ 13.0 MPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณที่มีความหนามากเสี่ยงต่อการเกิดรอยย่น ขณะเดียวกันบริเวณที่มีความหนาน้อยเสี่ยงต่อปัญหาทางด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง

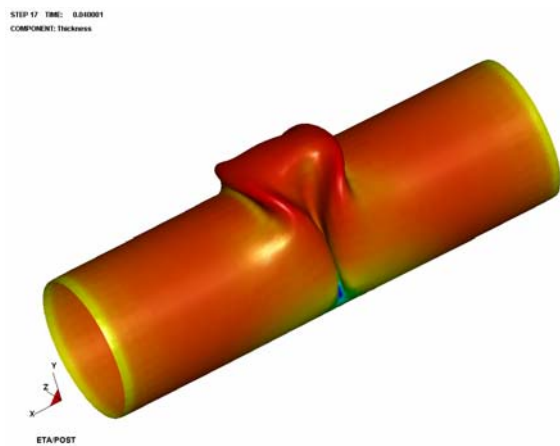


รูปที่ 10 การกระจายตัวของความหนาบนหน้าตัดตามแนวแกน x ที่แสดงในรูปที่ 9

เพื่อให้เห็นถึงรูปร่างชิ้นงานที่ผลิตภายใต้ความดันภายในที่ต่ำเกินไป รูปที่ 11 และ 12 แสดงชิ้นงานที่ขึ้นรูปภายใต้ความดัน 1.0 และ 2.0 MPa ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเกิดความล้มเหลวเนื่องจากความไม่เสถียรจากแรงกด (Compressive Instability) ในรูปแบบการโก่ง (Buckling Mode) อย่างชัดเจน ดังนั้นการออกแบบกระบวนการผลิตจึงควรมีการหาจุดเหมาะสมและครอบคลุมปัญหาทุกด้าน



รูปที่ 11 รูปร่างของชิ้นส่วนภายหลังจากการขึ้นรูปด้วย HF ที่ $P = 1.0 \text{ MPa}$



รูปที่ 12 รูปร่างของชิ้นส่วนภายหลังจากการขึ้นรูปด้วย HF ที่ $P = 2.0 \text{ MPa}$

5. อภิปรายและหมายเหตุสรุป

ในงานวิจัยนี้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อประกอบการออกแบบกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีลักษณะเป็นท่อโค้งแสดงในกรณีตัวอย่างในบทความนี้ จากผลการวิเคราะห์ดังที่ได้แสดงในรูปประกอบ และตารางที่กล่าวมาแล้วนั้น พบว่า ปัจจัยทางด้านความดันของของเหลวในท่อนั้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นส่วนที่ต้องการผลิต ถ้าเป็นไปได้ควรทำการควบคุมความดันของของเหลวให้สอดคล้องกับสถานะการขึ้นรูปในแต่ละช่วงเวลา เพราะ

จะช่วยให้ได้ชิ้นงานที่ดีตามความต้องการมากขึ้น ซึ่งถึงแม้จะเป็นการเพิ่มต้นทุน เนื่องจากต้องการกระบวนการที่มีความแม่นยำในการควบคุมขนาดความดัน ขณะเดียวกันตัวแปรตัดสินใจในการออกแบบ (Design Decision Variables) ก็เพิ่มขึ้นมากตามไปด้วย โดยบทบาททั่วไปของความดันของของเหลวในกระบวนการ HF นั้น จะช่วยพยุงผนังท่อไม่ให้ล้น เกิดเป็นรอยร่นจากแรงกดจากแม่พิมพ์ที่ป้อนเข้า และช่วยให้ท่อขยายไปปรับตามแนวผนังช่องว่างของแม่พิมพ์

การลองผิดลองถูกโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าการทำการทดลองจริงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยทั่วไปการทดลองจริงต้องใช้ทรัพยากรจำนวนมาก ขณะที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณกับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC workstation ที่มีตัวประมวลผล Intel Xeon 3.2 GHz และ RAM ที่ 1 GB ใช้เวลาแต่ละกรณีประมาณ 1 ชั่วโมง ทั้งนี้ทำให้เห็นถึงแนวโน้มของกระบวนการผลิต เพื่อประกอบการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพ การนำเอาแบบจำลองคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ ช่วยลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด พร้อมกับเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทางอ้อม ในขั้นตอนการออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง และต่อการพัฒนาของศักยภาพการผลิตของประเทศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Engineering Technology Associates Inc. (ETA) จาก USA สำหรับการสนับสนุนโปรแกรม Dynaform และ LS-DYNA และขอขอบคุณทุนวิจัย มจร. สำหรับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายบางส่วนของงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Amstead, B.H., Ostwald, P.F., and Begeman, M.L. Manufacturing Processes, Wiley, Singapore, 1986.
- [2] Belytschko, T., Lin, J.I., and Tsai, C.S. Explicit algorithms for one point quadrature shell element. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1984; 42: 225-251.
- [3] Buranathiti, T., and Cao, J. Inverse analysis to formability design in a deep drawing process. *JSME Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2007; 1, 6: 796-805.
- [4] Dohmann, F., and Hartl, C. Hydroforming - a method to manufacture light-weight parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996; 60: 669-676.
- [5] ETA. Dynaform: User's Manual Version 5.5, 2006.
- [6] Hartl, C. Research and advances in fundamentals and industrial applications of Hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005; 167: 383-392.
- [7] Keeler, S. P., and Backofen, W.A. Plastic Instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. *ASM Transactions Quarterly*, 1964; 56: 25-48.
- [8] Koc, M., Allen, T., Jiratheranat, S., and Altan, T. The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000; 40: 2249-2266.
- [9] LSTC. LS-DYNA User's Manual Version 960, 2005.
- [10] Nguyen, B.N., Johnson, K.I., and Khaleel, M.A. Analysis of tube hydroforming by means of an inverse approach. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2003; 125: 369-377.
- [11] Oh, S.-I., Jeon, B.-H., Kim, H.-Y., and Yang, J.-B. Applications of hydroforming processes to automobile parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006; 174: 42-55.
- [12] Xia, Z.C. Failure Analysis of Tubular Hydroforming. *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 2001; 123: 423-429.
- [13] ทวีภัทร์ บุณยธิติ และ อาณัติ โมฆิตพิพัฒน์. การศึกษาความไวของตัวแปรต่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปรางตัวยู. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549; 16, 3: 14-18.