



การจำลองสถานการณ์ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่นสำหรับศตวรรษที่ 21 Simulations in Sheet Metal Forming Industry for the 21st Century

ทวีภทร์ บุรณชิตี^{1*}

¹อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กทม. 10140

บทคัดย่อ

ต้นทุนทางด้านปิโตรเลียมที่สูงมากในปัจจุบันนี้และคาดว่าจะสูงอย่างต่อเนื่องในอนาคต เป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นในทุกๆ ภาคอุตสาหกรรม ในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่นมีกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์เป็นขั้นตอนสำคัญและมีต้นทุนสูงมากในระหว่างขั้นตอนการออกแบบและพัฒนา การอาศัยวิธีดั้งเดิมโดยการลองผิดลองถูกซึ่งต้องมีการปรับแก้อย่างต่อเนื่องได้สร้างปัญหาให้กับผู้ประกอบการเป็นอย่างมาก การปรับแก้แม่พิมพ์ใหม่หรือทำการทดลองในขนาดจริงหลาย ๆ ครั้ง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงมาก ประกอบกับไม่เป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพ ทำให้การจำลองสถานการณ์โดยการพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีบทบาทสำคัญมากในปัจจุบัน โดยเครื่องมือที่สำคัญหนึ่งในการแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่นนี้ คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเมื่อใช้ร่วมกับแบบจำลองวัสดุที่เหมาะสมจะมีศักยภาพเหมาะกับการประยุกต์ใช้ในศตวรรษที่ 21 นี้ เพื่อประสิทธิภาพในการวิเคราะห์และนำไปออกแบบกระบวนการผลิตโดยเฉพาะในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

Abstract

High petroleum cost nowadays and expectedly in the future is a major force driving the cost up in every industrial sector. In metal forming industry, tooling design is a very important and costly process in the design and development phase. By a traditional means, trial-and-error approach requires continuous corrections causing many problems to manufacturers since tooling corrections and real scale experiments are very costly and inefficient consumption of limited natural resources. As a result, simulations via computer models play an important role in the present time. An important tool to this problem solving in the sheet metal forming industry is a nonlinear finite element method. When it works together with proper material models, it has potential and is suitable for applications in the current 21st century to efficiently analyze and design manufacturing processes, especially in sheet metal forming.

คำสำคัญ : การจำลองสถานการณ์อุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะแผ่น การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

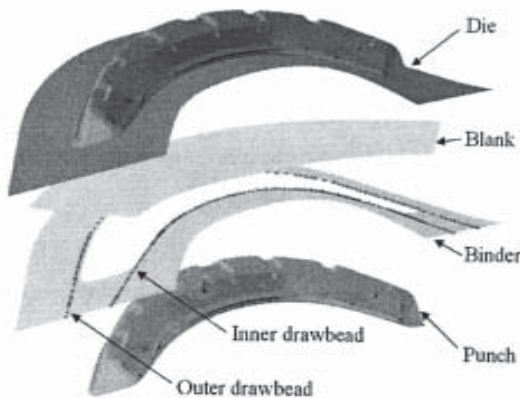
Key words : Simulation, Sheet Metal Forming Industry, Nonlinear Finite Element Analysis

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ thaweepat.bur@kmutt.ac.th โทร. 0-2470-8699 ต่อ 300



1. บทนำ

ในปัจจุบันราคาวัตถุดิบปิโตรเลียมอยู่ในระดับที่สูงมาก และคาดว่าจะสูงต่อไปอย่างต่อเนื่องในอนาคต เนื่องจากอุปทาน (Supply) ของพลังงานไม่สามารถเพิ่มขึ้นในอัตราเดียวกับอุปสงค์ (Demand) ของพลังงาน ประกอบกับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เนื่องจากกลไกของตลาดเสรี ทำให้ต้นทุนด้านพลังงานที่สูงขึ้นนี้เป็นตัวเร่งขับเคลื่อนที่สำคัญให้ต้นทุนการผลิตในทุกๆ ด้านสูงขึ้นในทุกภาคอุตสาหกรรม และการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพได้สร้างปัญหาผลกระทบต่อทางอ้อมกับสิ่งแวดล้อมสะสมเรื่อยมา ทำให้มีความต้องการที่จะลดต้นทุนต่างๆ โดยการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดนี้ให้น้อยที่สุด แต่เกิดประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 1 เครื่องมือในการขึ้นรูปวัสดุเป็นรูปแบบที่มีมูลค่าสูงในอุตสาหกรรมรถยนต์ (จาก Buranathiti *et al.*, 2005)

ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming Industry) เช่น การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ในรูปที่ 1 เป็นต้น พบว่ากระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ (Die Face Design) หรือเครื่องมือ (Tooling Design) เป็นขั้นตอนที่มีต้นทุนและต้องการใช้

ทรัพยากรธรรมชาติสูงมาก โดยเฉพาะในระหว่างขั้นตอนการออกแบบและพัฒนา (Design and Development Phase) ซึ่งตามวิธีดั้งเดิมนั้นการลองผิดลองถูก (Trial-And-Error Approach) กับการทดสอบการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จริง และรวมไปถึงการประมาณจากประสบการณ์ที่มีอยู่ของแต่ละนักออกแบบเป็นวิธีการพัฒนาหลัก ซึ่งวิธีการนี้มักต้องการการปรับแก้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดปัญหาทางด้านต้นทุนกับผู้ผลิต เพราะมีความจำเป็นต้องทำการผลิตแม่พิมพ์ใหม่หรือทำการทดลองในขนาดผลิตจริง ที่มีค่าใช้จ่ายสูง และประกอบกับไม่เป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพ (Efficient) ทำให้การจำลองสถานการณ์ (Simulation) โดยการพัฒนารูปแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Model) เป็นทางเลือกที่ขาดไม่ได้ในภาวะการแข่งขันที่สูงอย่างในปัจจุบัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Oden (2006) ที่เสนอต่อ NSF ว่าการจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์จะมีบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method หรือ FEM) เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่สำคัญในการจำลองสถานการณ์ทางวิศวกรรมจำนวนมาก อาจกล่าวได้ว่ามีการริเริ่มเทคนิคนี้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1943 โดย Courant แต่สมัยนั้นไม่ได้รับความสนใจมากนักกับวิธีการได้มาซึ่งผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solutions) ของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) ซึ่งอาจมาจากเหตุผลที่ว่าเกิดก่อนการกำเนิดของทรานซิสเตอร์ (Transistor) ในปี ค.ศ. 1947 โดย Bardeen และ Brattain

ในปี ค.ศ. 1960 Clough ได้เริ่มมีการใช้คำว่า finite element ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1960-1969 ได้มีการนำเอาผลเฉลยโดยประมาณมาใช้ในการวิเคราะห์ความเค้น (Stress Analysis) การไหลของของไหล (Fluid Flow) การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และศาสตร์ด้านอื่นๆ หลังจากนั้น FEM ได้รับความ

สนใจอย่างต่อเนื่องถึงปัจจุบันในการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อแก้ปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมขั้นสูงเรื่อยมา โดยปัจจัยส่วนหนึ่งเกิดจากความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น งานเขียนของ Kolata ในปี ค.ศ. 1974 ซึ่งคาดการณ์ว่า FEM จะเป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ปัญหาทางเทคนิคในอนาคตดูจะใกล้เคียงกับปัจจุบันพอสมควร สำหรับหนังสือ FEM เล่มแรกๆ ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเขียนโดย Zienkiewicz ในปี ค.ศ. 1977 และหนังสือ FEM ทางด้านปัญหาไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในปัจจุบันแต่งโดย Belytschko *et al.* ในปี ค.ศ. 2000

การประยุกต์แบบจำลอง Finite Element Analysis (FEA) กับงานขึ้นรูปโลหะที่มีผลกระทบในวงการอาจเริ่มนับได้จากปี ค.ศ. 1990 (จาก Mackerle, 2004) พร้อมกันนี้ได้มีการพัฒนาเทคนิคการแก้ปัญหาในรูปแบบอื่นๆ อยู่ตลอดเวลา เช่น Element Free Method, Meshless method, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE), Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) เป็นต้น ซึ่งการนำไปใช้ให้ได้ประโยชน์สูงสุดย่อมขึ้นกับพื้นฐานของปัญหาและความเข้าใจของผู้นำไปใช้ ทั้งนี้ในวงการด้านการสร้างแบบจำลองได้มีการจัดตั้ง International Conference and Workshop ที่ให้ความสำคัญกับการขึ้นรูปโลหะที่น่าสนใจ คือ NUMISHEET และ NUMIFORM ซึ่ง NUMISHEET มีความโดดเด่นในตรงที่ว่ามีการให้ผู้เข้าร่วมอาสาสมัครจากทั่วโลกทำการสร้างแบบจำลองวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ซับซ้อนหนึ่งเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบ (Benchmark) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้โดยอิสระต่อกัน เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนและศึกษาการพัฒนาของศาสตร์ในด้านนี้ บทความวิเคราะห์จากการศึกษาเปรียบเทียบได้ถูกรวบรวมใน Buranathiti and Cao (2005a) สำหรับกรณีที่ 1

และ Buranathiti and Cao (2005b) สำหรับกรณี ที่ 2

2. วิธีการศึกษา

2.1 กระบวนการขึ้นรูปโลหะ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming Processes) เป็นกระบวนการผลิตหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ในอุตสาหกรรมนี้ความต้องการทางด้านคุณภาพ (Quality) และความสามารถในการผลิตซ้ำ (Repeatability) ของผลิตภัณฑ์มีความสำคัญ ดังนั้นจึงมีการใช้แม่พิมพ์เพื่อให้งานที่ออกมามีมาตรฐานเดียวกัน เพื่อให้การออกแบบกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงกลไกการแปรรูปของวัสดุเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ปราศจากข้อบกพร่อง (Defects) ซึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นมีข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นอยู่หลักๆ 3 อย่างด้วยกัน คือ (1) การฉีกขาด (Tearing) (2) การเกิดรอยย่น (Wrinkling) และ (3) การสปริงตัวกลับ (Springback) ซึ่งทั้ง 3 ชนิดนี้เกิดจากปรากฏการณ์ที่แตกต่างกัน โดยในเบื้องต้นการฉีกขาดเกิดขึ้นจากภาวะกรรมในแนวระนาบที่มีค่าสูงเกินไป การเกิดรอยย่นเกิดจากความไม่เสถียร (Instability) จากภาวะกดในแนวระนาบที่มีค่าสูงเกินไป และการดีดตัวกลับเกิดจากการคืนตัวยืดหยุ่น (Elastic Recovery) ของโลหะภายหลังจากการแปรรูป

กลไกการแปรรูปของวัสดุ (Material Deformation Mechanism) ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นหลักๆ ประกอบไปด้วยการดัด (Bending) การดึง (Stretching) และภาวะในแนวระนาบ (In-Plane Loadings) ทั้งดึง (Tensile) และกด (Compressive) ดังนั้นการที่จะออกแบบกระบวนการที่ดีโดยการสร้างแบบจำลองนั้น ผู้ออกแบบควรมีความ

เข้าใจว่าแบบจำลองหนึ่งๆ ควรจะมีความสามารถในการอธิบายปรากฏการณ์ที่สำคัญต่อกลไกการผลิตนั้นๆ ด้วย เช่น Naceur *et al.* (2006) ได้ทำการควบคุมการสปริงตัวกลับและ Wrinkling ในการขึ้นรูปร่องตัวยูผ่านการออกแบบการทดลองคอมพิวเตอร์ Banu *et al.* (2007) ประยุกต์การจำลองสถานการณ์การสปริงตัวกลับและ Wrinkling กับชิ้นส่วนรางโครงสร้างที่ทำจากเหล็กกล้าสองเฟส (DP steel) เป็นต้น การออกแบบโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิตก็เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เช่น Sahai *et al.* (2004) ได้นำเอา springback มาใช้ประกอบในการออกแบบ Buranathiti *et al.* (2005) ได้นำเอา Tearing และ Wrinkling มาใช้ประกอบการออกแบบการขึ้นรูปชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น

2.2 แบบจำลองวัสดุ

การสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้น จำเป็นจะต้องเริ่มจากความเข้าใจด้านฟิสิกส์ของระบบก่อน โดยฟิสิกส์ของกระบวนการขึ้นรูปโลหะหลักๆ นั้นเริ่มจากการสร้าง Constitutive Equation ของสมการโมเมนตัม (Momentum Equation) ในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) โดยมีรูปแบบ Tensor ดังนี้

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_i} + f_i = \rho \cdot \dot{x}_i \quad (1.)$$

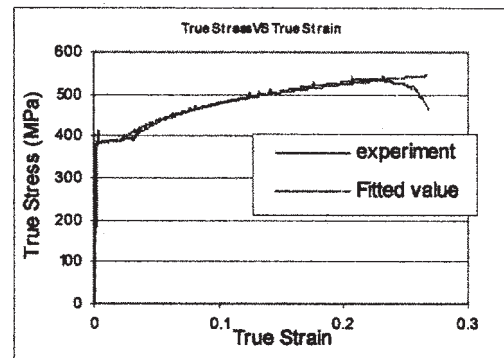
โดย σ เป็นค่าความเค้น f_i เป็นค่า Body force และ ρ เป็นค่าความหนาแน่น

นอกจากนี้แบบจำลองวัสดุ (Material Model) ก็มีความสำคัญต่อความแม่นยำของแบบจำลองการศึกษาผลกระทบจากเนื้อวัสดุที่เป็นผลึก (Crystallographic Texture) ของโลหะสามารถช่วยให้

เข้าใจถึงปรากฏการณ์ได้หลายๆ อย่างโดยใช้ทฤษฎี Crystalline Plastic สำหรับการศึกษามบัตินทางกลในช่วงพลาสติกซิติ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยรูปแบบจำลองที่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย คือ สมการของ Hollomon สำหรับความเค้น (σ) สูงกว่าจุดคลาก (หรือ Yield point) ที่มีรูปแบบยกกำลัง ดังนี้

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.)$$

โดย ε เป็นค่าความเครียด (Strain) ส่วน K เป็นค่า Strength Coefficient และ n เป็นค่า Hardening Exponent



รูปที่ 2 แสดงเส้นการไหล (Flow Curve) ระหว่างความเค้นและความเครียด

สำหรับสมการความคลาก (หรือ Yield criterion) ที่อธิบายสถานะความเป็น Plasticity ก็มีความสำคัญมาก และมีแบบจำลองจำนวนมากเสนออยู่ เพื่อการประมาณสถานะ Plasticity เช่น von Mises, Tresca, Hill, Hosford, Barlat และอื่นๆ โดยรูปแบบทั่วไป คือ

$$f = f(\sigma) = 0 \quad (3.)$$

โดย Yield Function หนึ่งๆ จะมีค่าบวกหรือลบที่มีความหมาย ดังนี้ คือ $f(\sigma) > 0$ แสดงว่าไม่มีการแปรรูปอย่างถาวร $f(\sigma) < 0$ แสดงว่าสามารถเกิดการแปรรูปอย่างถาวร และเป็นเงื่อนไขที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้

เงื่อนไขตั้งฉาก (Normality Condition) ใน Stress Space ช่วยอธิบายทิศทางของการแปรรูปสามารถแสดงในรูป Associated Equation ดังนี้

$$d\varepsilon_p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (4.)$$

โดย $d\lambda$ เป็นค่าคงค่าหนึ่ง

2.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น

วิธีการเชิงตัวเลขโดย FEM ถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในการวิเคราะห์แก้ปัญหาซับซ้อนทางวิศวกรรม ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะนั้นมีความพิเศษกว่ากระบวนการแปรรูปของโครงสร้างโดยทั่วไปซึ่งมักจะพิจารณาเฉพาะระบบที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้นหรืออยู่ภายใต้กฎของ Hooke โดย Nonlinear FEM มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์การแปรรูปพลาสติก เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ จึงทำให้การวิเคราะห์ต้องเป็นแบบสืบเนื่อง (Increment) หรือรวมเรียกว่า Incremental Nonlinear FEM ทั้งนี้ในการจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปวัสดุนั้นเทคนิค Lagrangian Scheme เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกว่า Eulerian Scheme ซึ่งเหมาะสมกับการวิเคราะห์การไหลของของไหล (Fluid) มากกว่า

ดังนั้น Incremental Lagrangian FEM ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการขึ้นรูปวัสดุจะได้ออกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ Implicit Scheme และ Explicit Scheme โดยปัญหาหรือระบบซับซ้อนใหญ่ๆ ในกระบวนการขึ้นรูปนั้น วิธี Explicit FEA มักจะถูกนำไปใช้มากกว่าเนื่องจากขนาดของปัญหาทำให้ความต้องการทรัพยากรการคำนวณเพิ่มขึ้นแบบเพียงเชิงเส้น (Linear Growth) ในขณะที่วิธี Implicit FEA จะเพิ่มขึ้นแบบกำลังสอง (Quadratic Growth) ซึ่งประเด็นนี้ทำให้ วิธี Explicit FEA ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้การพัฒนาเทคโนโลยีเอลิเมนต์

(Element Technology) ก็ทำได้ง่ายกว่าวิธี Implicit FEA เนื่องจากผู้พัฒนาไม่จำเป็นต้องพิสูจน์หรือพัฒนาเมตริกซ์ Jacobian ที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับ Explicit FEM ในเบื้องต้นนั้นใช้ Central Finite Difference Scheme (จาก Belytschko *et al.*, 2000) ดังนี้

$$t^{n+1/2} = \frac{1}{2} t^{n+1} + t^n \quad (5.)$$

$$\Delta t^{n+1/2} = t^{n+1} - t^n \quad (6.)$$

และ

$$d^{n+1/2} = \frac{1}{\Delta t^{n+1/2}} (d^{n+1} - d^n) \quad (7.)$$

โดย d^n เป็นการขจัด (Displacement) ที่ขั้นที่ n

ซึ่งธรรมชาติของวิธีนี้มีปัญหาทางด้านความเสถียรเชิงตัวเลข (Numerical Stability) ทำให้ก้าวหรือ step size ของวิธีนี้ในเบื้องต้นถูกจำกัดด้วยขนาดของเอลิเมนต์ และคุณสมบัติของวัสดุ โดย critical time step size (Δt^*) จะถูกกำหนดโดย

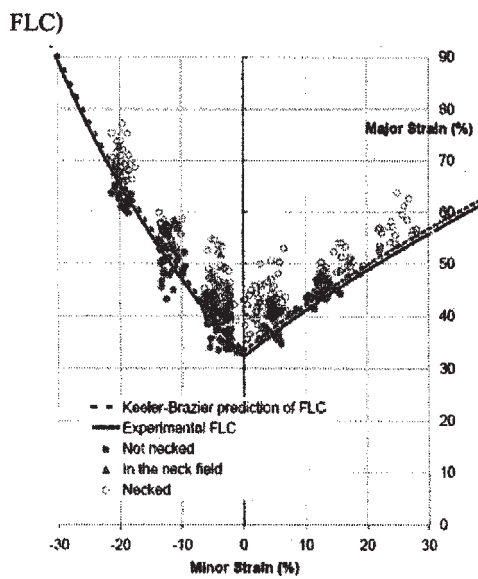
$$\Delta t^* = \frac{l_{\min} \sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \quad (8.)$$

โดย l คือ ขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็กที่สุด และ E คือ ค่า Young's Modulus ของวัสดุ

นอกจากนี้ได้มีการประมาณความไม่เชิงเส้นของวัสดุโดยนำเอาทฤษฎีการแปรรูป (Deformation Theory) เข้ามาในการวิเคราะห์การขึ้นรูปโดยประมาณ ซึ่งรู้จักในชื่อ การวิเคราะห์ย้อนกลับ (Inverse Analysis) หรือ One-step forming มีการนำเอาสมมติฐานจำนวนหนึ่งเข้ามาเพื่อทำให้การคำนวณง่ายขึ้น ซึ่ง Buranathiti and Cao (2007) แสดงการนำมาประยุกต์ใช้ในงานออกแบบการขึ้นรูปโลหะแผ่น

2.4 การวิเคราะห์ความสามารถในการขึ้นรูป

ในการออกแบบกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ปัจจัยที่บอกว่าการบวนการจะประสบความสำเร็จในการขึ้นรูปนั้น คือ ชิ้นงานที่ได้ไม่ฉีกขาด (Tearing) หรือไม่ม้วนย่น (Wrinkling) แบบจำลองที่สามารถพยากรณ์ความเสียหายนี้ โดยเฉพาะการฉีกขาด สามารถประมาณรวมออกมาอยู่ในรูปแบบแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram หรือ FLD) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเริ่มใช้จากงานของ Keeler and Backofen (1964) โดยในเบื้องต้นจะต้องทำการทดลองซ้ำๆ กันจำนวนมาก จนกว่าจะได้เส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve หรือ FLC)



รูปที่ 3 แสดง FLD ของวัสดุหนึ่ง (จาก Keeler, 2003)

เพื่อลดจำนวนการทดลอง จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อการประมาณ FLC นี้ แบบจำลองที่สำคัญ คือ แบบจำลองของ Marciniak and Kuczynski (1967) ซึ่งได้เพิ่มเงื่อนไขความไม่สมบูรณ์ (Imperfection Condition) เข้ามาในการวิเคราะห์ โดยหลักๆ แล้วให้แนวหนึ่งที่มีความหนาที่น้อยกว่าปกติ

ซึ่งมักจะกำหนดตั้งแต่ 90-99% โดยพื้นฐานของแบบจำลองจะใช้ข้อมูลการไหลของวัสดุหลักๆ กับค่า K , n และ R ซึ่งค่า R เป็นตัวแปรความไม่เป็นทิศทางเดียวกัน (Anisotropy Parameter) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญหนึ่งในการบอกความสามารถในการขึ้นรูป เงื่อนไขเบื้องต้นของความไม่เสถียรทางพลาสติก (Plastic Instability Condition) คือ ไม่ต้องเพิ่มภาระกรรม (F) แต่มีการแปรรูปเพิ่มขึ้น หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$dF = 0 \quad (9.)$$

จากแบบจำลองของ Swift (1952) ทำให้ FLC ของ Quadrant ที่ 2 (หรือซีกซ้ายในรูปที่ 3) เป็นไปตามสมการ

$$\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* = n \quad (10.)$$

โดยที่ ε_1^* , ε_2^* คือความเครียดหลักวิกฤต (Critical Principal Strains) ส่วน Quadrant ที่ 1 นั้น มีแบบจำลองจำนวนมากที่ได้เสนอขึ้นมา บทความนี้ขอยกเอาแบบจำลองของ Semtin and Jonas (1984) ได้รวมปัจจัยจากตัวแปร R เข้ามาแสดงรูปแบบดังนี้

$$\varepsilon_1^* = \frac{Z_d}{AB} n \quad (11.)$$

$$\varepsilon_2^* = \beta \varepsilon_1^* \quad (12.)$$

โดยที่

$$Z_d = \sqrt{\frac{2(2+R)}{3}} \left[\frac{[(1+R)-2R\beta+(1+R)\beta^2]^{1.5}}{(1+R)^2-(2+R)R\beta-(2+R)R\beta^2(1+R)^2\beta^2} \right] \quad (13.)$$

$$A = \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+2R)^2}} \quad (14.)$$

$$B = \sqrt{(1+R+R\beta)^2+(R+\beta+R\beta)^2+(1-\beta^2)R} \quad (15.)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (16.)$$



จากแบบจำลองดังกล่าวนี้ มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่า มีการสมมติว่าประวัติการแปรรูป (Deformation History) เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งในสภาวะการขึ้นรูปจริงนั้น ไม่ได้เป็นไปตามสมมติฐานข้างต้นอย่างเคร่งครัด ดังแสดงใน Buranathiti and Cao (2007) ดังนั้น การนำไปใช้จึงต้องมีการเผื่อไว้หรือ Safety Margin ใน Keeler (2003) หรือใช้แบบจำลองที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เช่น ใน Yao and Cao (2002) เป็นต้น ซึ่งในอุดมคติแล้วจะต้องวิเคราะห์ประวัติการแปรรูปของแต่ละเอลิเมนต์เดี่ยว ทำให้แนวทางนี้ดูเหมือนจะถูกนำไปใช้จริง ๆ ในภาคอุตสาหกรรมได้ค่อนข้างยากในอนาคตอันใกล้

3. สรุป

การสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์และออกแบบกระบวนการผลิต โดยไม่จำเป็นต้องทำการทดลองจริงที่ใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง มีศักยภาพสูงและความเป็นไปได้ (Feasibility) ในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก ผู้ออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิตต่าง ๆ ที่ไม่คุ้นเคยหรือลองแบบใหม่ ๆ ได้โดยง่าย เช่น การวิเคราะห์ตำแหน่งและขนาดของ Drawbead บนแม่พิมพ์ขึ้นรูปผนังประตูรถยนต์ หรือการวิเคราะห์สภาวะการผลิตใน Hydroforming เป็นต้น ซึ่งการลองผิดลองถูกในสภาวะจริงจะก่อปัญหาด้านต้นทุน จากที่กล่าวมาสามารถเห็นได้ว่า การจำลองสถานการณ์โดยการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์มีแนวโน้มจะมีความสำคัญยิ่งในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะ ในศตวรรษที่ 21 ที่มีการแข่งขันกันอย่างเสรี

นอกจากนี้การนำเอาเทคโนโลยีหาค่าเหมาะสม (Optimization technology) เข้ามาประกอบการออกแบบทางวิศวกรรมก็มีบทบาทมากขึ้น เช่น งานการออกแบบ Wheelhouse ใน Buranathiti et al. (2005) ที่มีการออกแบบให้มีความน่าจะเป็นที่จะผลิตชิ้นส่วนที่สมบูรณ์สูงสุด Song et al. (2007)

ได้ประยุกต์แบบจำลอง FEM ในการออกแบบสภาวะการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นต้น และในอนาคตมีการคาดการณ์ว่า Multi-scale Modeling Technology จะเข้ามาเป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยในการพัฒนาแบบจำลองวัสดุ โดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของวัสดุที่ระดับไมโคร (Micro) หรือนาโน (Nano) กับสมบัติทางกลของวัสดุที่ระดับแมโคร (Macro) เนื่องจากขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในปัจจุบัน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญหนึ่งของการจำลองสถานการณ์ และวิธีแบบ Incremental Explicit เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงเหมาะกับการแก้ปัญหาซับซ้อนในอุตสาหกรรมขึ้นรูปโลหะ ถึงแม้ว่าการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะมีข้อดีจำนวนมากแต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ด้วย ทั้งนี้จุดมุ่งหมายเบื้องต้นของการสร้างแบบจำลอง คือ ให้ผลพยากรณ์ที่ได้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง หรือแบบจำลองเป็น Valid Model ดังแสดงวิธีการทำ Model Validation ใน Buranathiti et al. (2006) ที่ต้องเปรียบเทียบกับ การทดลองจริงและพิจารณาความไม่แน่นอนของระบบ โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องมีความแม่นยำ ในบางกรณีผู้ใช้จะต้องมีการปรับแต่งแบบจำลองหรือสร้างเงื่อนไขสมมูล (Equivalent Conditions) ที่เหมาะสมขึ้นมาประกอบ นอกจากนี้ผู้ออกแบบและผู้ใช้จำเป็นต้องเข้าใจทฤษฎีพื้นฐาน การพัฒนาของเทคโนโลยี และแง่มุมด้านการคำนวณ เช่น งานใน ทวิภัทร์ และ อาณัติ (2549) ได้ศึกษาปัจจัยเชิงตัวเลขที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปร่องด้วย เป็นต้น ประกอบกันเพื่อให้เกิดการผลิตที่มีประสิทธิภาพ (Effective) และประสิทธิภาพ (Efficient) สูงสุดต่อไป

4. เอกสารอ้างอิง

- Banu, M., Takamura, M., Hama, T., Naidim, O., Teodosiu, C., and Makinouchi, A. 2006. Simulation of springback and wrinkling in stamping of a dual phase steel rail-shaped part, **Journal of Materials Processing Technology**, 173, 178-184.
- Belytschko, T., Liu, W.K., and Moran, B. 2000. **Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures**, John Wiley & Sons : New York.
- Buranathiti, T., and Cao, J. 2005a. "NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Deck Lid Inner Panel: Benchmark 1," **The 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes NUMISHEET**, Detroit. (2005, August 15-19) 996-1003.
- Buranathiti, T., and Cao, J. 2005b. "NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Underbody Cross Member: Benchmark 2," **The 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes NUMISHEET**, Detroit. (2005, August 15-19) 1113-1120.
- Buranathiti, T., Cao, J., Xia, Z.C., and Chen, W. 2005. Probabilistic Design in a Sheet Metal Stamping Process under Failure Analysis, **The 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes NUMISHEET**, Detroit, 867-872.
- Buranathiti, T., Cao, J., Chen, W., Baghdasaryan, L., and Xia, Z.C. 2006. "Approaches for Model Validation: Methodology and Illustration on a Sheet Metal Flanging Process", **ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 128, 2, 588-597.
- Buranathiti, T., and Cao, J. 2007. Inverse Analysis to Formability Design in A Deep Drawing Process, **JSME Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering**, 1, 6.
- Keeler, S. P., and Backofen, W.A. 1964. Plastic Instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, **ASM Transactions Quarterly**, 56, 25-48.
- Keeler, S. 2003. **the enhanced FLC effect**, Project Team Technology Report, The Auto/Steel Partnership.
- Kolata, G.B. 1974. The finite element method: A mathematical revival, **Science**, New Series, 184, 4139, 887-889.
- Mackerle, J. 2004. Finite element analyses and simulations of sheet metal forming processes: Bibliography, **Engineering Computations**, 21, 8, 891-940.
- Marciniak, Z., and Kuczynski, K. 1967. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, **International Journal of Mechanical Science**, 9, 9, 609-620.
- Naceur, H., Guo, Y.Q., and Ben-Elechi, S. 2006. Response surface methodology for design of sheet forming parameters to control springback effects, **Computers & Structures**, 84, 1651-1663.

14. Oden, J.T. (Chair), Revolutionizing Engineering Science through Simulation, **National Science Foundation Blue Ribbon Panel Report**, May 2006, 65p.
15. Sahai, A., Schramm, U., Buranathiti, T., Chen, W., Cao, J., and Xia, Z.C. 2004. Sequential Optimization and Reliability Assessment Method for Metal Forming Processes, **the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes NUMIFORM**, Ohio State University, Columbus.
16. Semtin, S.L., and Jonas, J.J. 1984. Formability and workability of metals: Plastic Instability and Flow Localization, **American Society for Metals**, Metals Park, Ohio, 299p.
17. Song, J.-H., Huh, H., Kim, S.-H. 2007. A simulation-based design parameter study in the stamping process of an automotive member, **Journal of Materials Processing Technology**, 189, 450-458.
18. Swift, H.W. 1952. Plastic instability under plane stress, **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1, 1-18.
19. Yao, H., and Cao, J. 2002. Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with prestrain induced backstress, **International Journal of Plasticity**, 18, 8, 1013-1038.
20. Zienkiewicz, O.C. 1977. **The Finite Element Method**, McGraw-Hill, London.
21. ทวีภัทร์ บุรณิทธิ และ อาณัติ ไชยิตพิพัฒน์. 2549. การศึกษาความไวของตัวแปรต่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปรางตัวยู. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 16, 3, หน้า 14-18.