

การควบคุมการสปริงตัวกลับโดยการประยุกต์ใช้ดรอปีดในการขึ้นรูปร่างด้วย Springback Control by Applying Drawbead in U-channel Forming

ณรงค์เดช บุญเชื้อ¹ และ ปุริต ธนะกิจเกษม^{2*}
Narongdesh Boonchua¹ and Purit Thanakijkasem^{2*}

บทคัดย่อ

ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นในอุตสาหกรรม เช่น งานขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น การสปริงตัวกลับเป็นปัญหาสำคัญหนึ่ง ทั้งนี้ปรากฏการณ์การสปริงตัวกลับเป็นผลมาจากสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุและภาวะการตัดจากกระบวนการขึ้นรูป บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลข (หรือระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น) มาประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับพร้อมกับการจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปโลหะแผ่น บทความนี้แสดงถึงผลกระทบของดรอปีดต่อการสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปร่างด้วยเป็นกรณีศึกษา พบว่าการเพิ่มแรงจับยึดโดยการปรับรูปร่างของดรอปีดมีแนวโน้มช่วยลดขนาดของการสปริงตัวกลับ แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งจะเป็นการเพิ่มแนวโน้มการฉีกขาดของโลหะแผ่นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการนำดรอปีดมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการสปริงตัวกลับจึงต้องหาจุดเหมาะสมไม่ให้มากเกินไปหรือน้อยไป ประเด็นเชิงตัวเลขและแง่มุมการนำไปใช้ได้ถูกนำมาอภิปรายประกอบด้วยในบทความนี้

คำสำคัญ: การสปริงตัวกลับ ดรอปีด การขึ้นรูปร่างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้น

Abstract

In sheet metal forming such as automobile part forming, springback is an important major problem. Springback phenomenon is a result of elasticity of materials and bending from forming processes. This paper applies numerical models (or nonlinear finite element methods) to predict the springback as well as the sheet metal forming simulation. This paper presents effects of drawbeads to springback in u-channel forming as a case study. It is found that an increase of the restraining force by a change of the drawbead's geometry tends to reduce the magnitude of springback. However, at one point, the increase will significantly increase the tendency of tearing. Therefore, the drawbead application in springback control must be optimized. Numerical issues and Implementation aspects are also discussed in the paper

Keywords: Springback, Drawbead, U-channel Forming, Nonlinear Finite Element Method

¹ นักศึกษา สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* Corresponding Author, Tel. 0-2470-8695 Ext. 300 , E-mail: purit.tha@kmutt.ac.th

1. บทนำ

การสปริงตัวกลับ (Springback) เป็นปรากฏการณ์ทางกลหนึ่งที่เกิดขึ้นหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่างของชิ้นงาน และมีผลกระทบที่ชัดเจนกับกรณีโลหะแผ่นหลังจากการขึ้นรูป (Forming) หรือเมื่อมีการปล่อยแรงกระทำออก (Unloading) ปัญหาการสปริงตัวกลับนี้ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะกับการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ เช่น การขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งมักเป็นงานขึ้นรูปเย็น (Cold Forming) เป็นต้น เพราะแม้ว่าจะมีมุมเพียงเล็กน้อยแต่รูปร่างที่เปลี่ยนไปจะเป็นสัดส่วนต่อความยาว สามารถทำให้เกิดระยะพิคัดผิดพลาดที่สูงได้ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อในกระบวนการประกอบ ทำให้ต้องมีการออกแบบและทดสอบกระบวนการผลิตที่รัดกุมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างที่ต้องการ ซึ่งวิธีที่ดีที่สุด คือการทดสอบกับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ก่อนการนำไปทดสอบจริงต่อไป

วิธีการพยากรณ์การสปริงตัวกลับนั้นโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ 1) แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (Analytical Model) และ 2) แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model) ในบทความนี้จะได้นั้นไปที่แบบจำลองเชิงตัวเลขที่รู้จักในชื่อ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method หรือ FEM) และเนื่องจากลักษณะเฉพาะของปัญหาการขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องใช้ FEM แบบไม่เชิงเส้นเข้ามาวิเคราะห์

โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขเป็นที่นิยมและใช้ในทางปฏิบัติ Cao et al. [1] ใช้วิธีไม่มีเอลิเมนต์ (Element Free Method) มาพยากรณ์การสปริงตัวกลับ Li et al. [2] ทำการศึกษาความไวของตัวแปรต่อความแม่นยำของการพยากรณ์การสปริงตัวกลับ ที่เน้นไปที่จำนวนจุดอินทิเกรตว่ามีผลอย่างไร ซึ่งได้สรุปว่าควรมีจำนวนตั้งแต่ 25 ถึง 51 ถ้าต้องการให้การพยากรณ์ดีในกรณีส่วนใหญ่ ขณะที่ Wagoner and Li [3] มุ่งเน้นไปที่การพิสูจน์ว่าจำนวนจุดอินทิเกรตมีผลต่อความแม่นยำในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับ โดยใช้แบบจำลองคาน

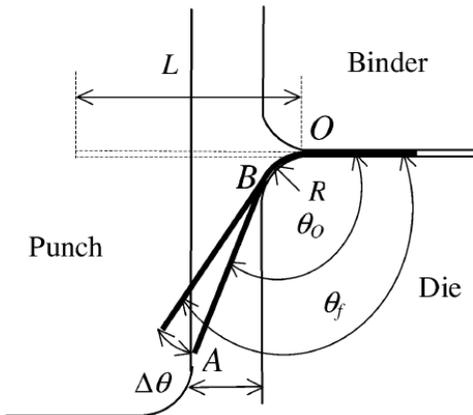
อย่างง่ายภายใต้แรงดึง มาทำการอินทิเกรตโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Integration) และวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Integration) ส่วน ทวิภัทร์ และ อาณัติ [4] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปร่างด้วยฟิวดัน FEM

ในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับนั้น FEM เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่ในทางปฏิบัติผู้ออกแบบกระบวนการผลิตมักจะให้ความสำคัญที่การควบคุมการสปริงตัวกลับเพื่อให้ชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุดประสงค์ดังกล่าวอาจจะบรรลุได้โดยการลดขนาดของการสปริงตัวกลับ และ/หรือการดัดขึ้นรูปให้มากกว่า (Overbend) เพื่อให้การสปริงตัวกลับ มาที่รูปร่างที่ต้องการ หรือ การทดแทนการสปริงตัวกลับ (Springback Compensation) ซึ่งบทความนี้ได้เน้นไปที่แนวทางการลดขนาดของการสปริงตัวกลับ โดยการประยุกต์ใช้ดรอปีด (Drawbead) ในกรณีศึกษาการขึ้นรูปร่างด้วย และเพื่อให้การศึกษาสมบูรณ์จึงจำเป็นต้องจำลองสถานการณ์กระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสม แล้วส่งต่อข้อมูลเพื่อไปสู่การพยากรณ์การสปริงตัวกลับต่อไป

2. การสปริงตัวกลับ

ปรากฏการณ์การสปริงตัวกลับ (Springback Phenomenon) เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นเสมอ โดยเฉพาะกับงานขึ้นรูปที่มีการดัด (Bending) ลักษณะการเกิดการสปริงตัวกลับแบบหนึ่งที่แสดงในรูปที่ 1

กำหนดให้ θ_0 เป็นมุมของโลหะแผ่นที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์หรือภายใต้แรงกระทำ (Loading) หรือสภาวะก่อนการสปริงตัวกลับ (Before Springback) แต่เมื่อนำเอาแม่พิมพ์ออกหรือภายหลังปลดปล่อยแรงกระทำ (Unloading) ทำให้โลหะแผ่นมีการสปริงตัวกลับทำให้เกิดเป็นมุม θ_f หรือเรียกว่าสภาวะหลังการสปริงตัวกลับ (After Springback) ทั้งนี้อาจกำหนดให้ $\Delta\theta$ เป็นมุมของการสปริงตัวกลับ (Springback Angle)



รูปที่ 1 การเกิดการสปริงตัวกลับ [5]

ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการนี้คือ ค่าโมเมนต์ดัด (Bending Moment หรือ M) ที่เกิดขึ้นระหว่างความหนาของโลหะแผ่น ดังแสดงในสมการที่ 1

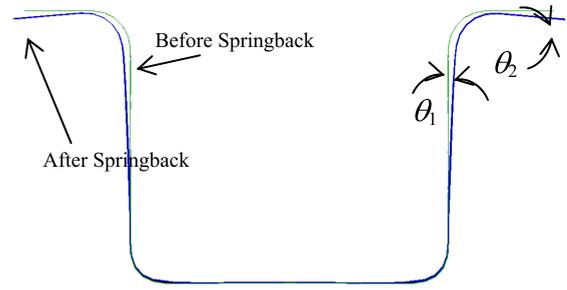
$$M = \int_{-t/2}^{t/2} \zeta \cdot \sigma \cdot \zeta d\zeta \quad (1)$$

โดยที่ ζ เป็นพิกัดในบริเวณ (Local Coordinate) ตลอดแนวความหนา t และ σ เป็นค่าความเค้นตลอดแนวความหนา t

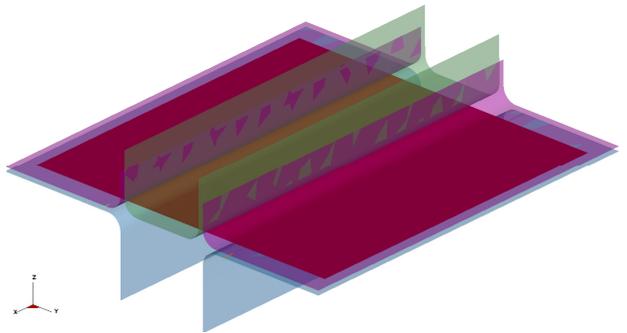
เพื่อให้การวิเคราะห์การสปริงตัวกลับในบทความนี้มีความชัดเจน จึงกำหนดมุม 2 มุม คือ θ_1 และ θ_2 แสดงในรูปที่ 2 โดยเส้นบางแสดงรูปร่างของรางตัวยูก่อนการสปริงตัวกลับ และเส้นหนาแสดงรูปร่างของรางตัวยูภายหลังการสปริงตัวกลับ โดยขนาดของการสปริงตัวกลับดูได้จากขนาดของมุมที่เปลี่ยนไปจากเดิม

3. การจำลองสถานการณ์

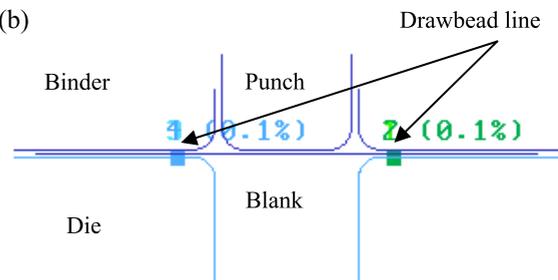
การขึ้นรูปร่างตัวยู (U-channel Forming) ที่เป็นกรณีศึกษาในบทความนี้ เป็นการแสดงพฤติกรรมของการสปริงตัวกลับของการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยแม่พิมพ์ (Tooling) ที่ใช้แสดงในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วย ตัวกด (Punch) ตัวประสาน (Binder) ตัวตาย (Die) ตัวดรอปปิด (Drawbead) และโลหะแผ่นวัตถุดิบ (Blank) กำหนดให้



รูปที่ 2 การเกิดสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปร่างตัวยู (a)



(b)



รูปที่ 3 องค์ประกอบสำคัญของการขึ้นรูปร่างตัวยู (a) Iso View (b) Front View

ขอบมุมของแม่พิมพ์มีคาร์ซีมี 6 mm ให้ช่องว่าง (Gap) ระหว่าง Punch และ Die เป็น 2 mm โดยแบบจำลองกำหนดให้มีขนาดใหญ่กว่า Blank และกำหนดให้ Punch กด Blank ลึกลงไปประมาณ 30 mm มี Drawbead ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

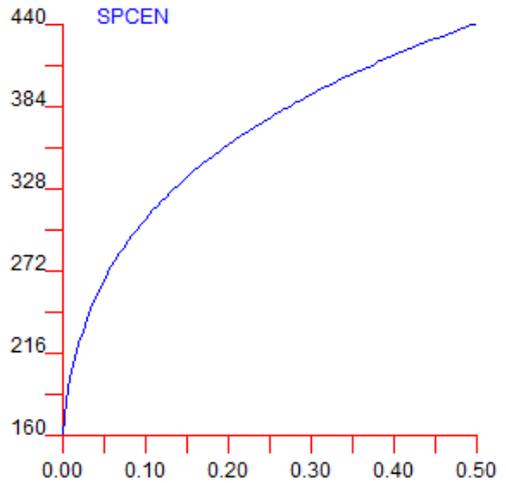
กำหนดให้ Blank ที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ เหล็กกล้า JIS-SPCEN ซึ่งเป็นโลหะที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปในชิ้นส่วนยานยนต์ในปัจจุบัน มีความหนาแน่น 7850 kg/m³ ค่า

มอดูลัสของ Young (E) ที่ 207 GPa ค่าอัตราส่วนของ Poisson (ν) ที่ 0.28 โดยที่วัสดุมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปพลาสติกตาม Flow Curve แสดงในรูปที่ 4 มีความไม่เป็นที่ทิศทางเดียวเชิงระนาบ (Planar Anisotropy Parameter, R) ที่ $R = 2.7$ ใช้เงื่อนไขการคราก (Yield Criterion) ที่มีสัมประสิทธิ์ยกกำลัง $m = 6$ ทางด้านรูปร่างของ Blank เลือกใช้ที่ความหนา 1 mm มีขนาด กว้าง x ยาว 140 x 140 mm² เพื่อให้มีลักษณะเป็นความเครียดระนาบ (Plane Strain) จะได้การเปลี่ยนรูปที่สม่ำเสมอ และสามารถสรุปมุมการสปริงตัวกลับได้อย่างสอดคล้องกัน

การจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปรูปร่างตัวยูนี้ สามารถทำได้โดยการประยุกต์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Model) โดยโปรแกรม Dynaform [6] และ LS-DYNA [7] สำหรับทั้งกระบวนการขึ้นรูปและการสปริงตัวกลับ โดยวิธีการคำนวณในช่วงการขึ้นรูปจะใช้รูปแบบชัดแจ้ง (Explicit) ขณะที่วิธีการคำนวณในช่วงสปริงตัวกลับใช้รูปแบบปริยาย (Implicit) การคำนวณทั้งหมดทำบนตัวประมวลผล Intel Xeon E5620 @2.33 GHz และ RAM ที่ 6 GB

ในขั้นตอนการขึ้นรูปใช้เอลิเมนต์โครงสร้างแบบเปลือก (Shell) ที่มีการอินทิเกรตแบบลดรูปตามแบบของ Belytschko *et al.* [8] ในการจำลอง Blank กำหนดให้จำนวนจุดอินทิเกรตตามแนวความหนา (Number of Integration Points, NIP) เป็น 5 จุด โดยแต่ละเอลิเมนต์มีขนาดประมาณ 30 mm และมีจำนวนประมาณ 246 เอลิเมนต์ ขณะที่กำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนตาข่าย (Mesh Adaptivity) ได้ 4 ระดับ ขณะที่แม่พิมพ์อื่นๆ กำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง สำหรับกระบวนการขึ้นรูปนั้น กำหนดแรงประสาน (Binder Force) กดไปที่โลหะแผ่น 3 kN และตัวกด (Punch) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1,000 mm/s ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไปจากขีดจำกัดจากวิธี Explicit

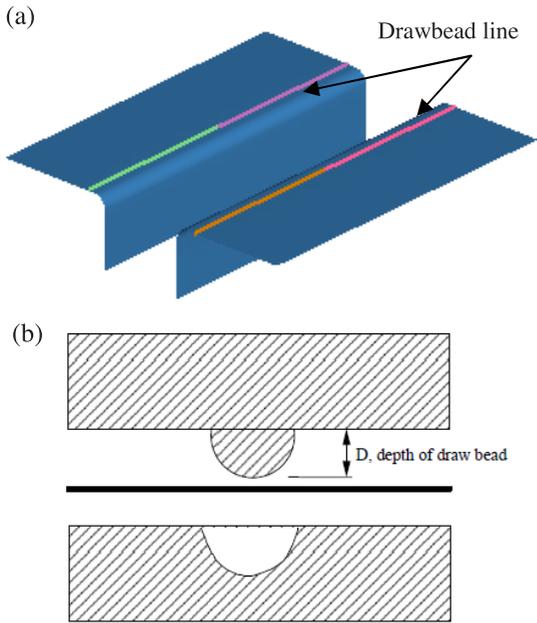
นอกจากนี้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้ Drawbead เพื่อควบคุมการไหลของโลหะแผ่นให้ดียิ่งขึ้น จึงได้นำตรอบัดแบบเส้น (Line Drawbead) มาประยุกต์ใช้และจะได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าแรงจับยึด



รูปที่ 4 แผนภูมิความเค้น (หน่วย MPa) และความเครียด (ตามลำดับ) ของ SPCCEN [6]

(Restraining Force) เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมต่อไป ทั้งนี้ในการวิเคราะห์เพื่อให้เห็นสัดส่วนความเปลี่ยนแปลงจึงได้กำหนดค่าแรงจับยึดเป็นสัดส่วนกับค่าแรงจับยึดสูงสุดที่ 423 N/mm (คิดเป็น 100%) คือที่ 0% 10% 20% เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 100% (เพื่อความกระชับจะเรียกกรณีดังกล่าวว่า P00, P10, P20, ..., P100 ตามลำดับ) ทั้งนี้ค่าแรงจับยึดสูงสุดที่ 100% ดังกล่าวมีค่าสูงมาก Drawbead มีความคมมาก คือรัศมีเล็กมากประมาณ 3 mm มีความลึกมากประมาณ 20 mm ซึ่งมักไม่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ แต่เพื่อให้เห็นแนวโน้มในการศึกษาจึงได้นำมาเป็นตัวอ้างอิง โดยแบบจำลอง Drawbead เป็นเส้นตามแนวลิ้นกวางบน Die ทั้งสองข้างดังแสดงในรูปที่ 5(a) ขณะที่รูปร่างเรขาคณิตเบื้องต้นของ Drawbead แสดงในรูปที่ 5(b) ซึ่งมีลักษณะตัวล๊อคบนตัวตายและตัวประสานเพื่อควบคุมการไหลของ Blank

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจำลองสถานการณ์การขึ้นรูปรูปร่างตัวยูแล้ว ก็จะได้นำไฟล์ข้อมูลของ Blank ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปที่อยู่ในไฟล์ *.dynain เข้ามาเพื่อทำการวิเคราะห์การสปริงตัวกลับ ทั้งนี้ในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับนั้นต้องมีการปรับเปลี่ยนชนิดของเอลิเมนต์ให้เป็นแบบอินทิเกรตเต็มรูป (Fully-Integrated Element) จาก

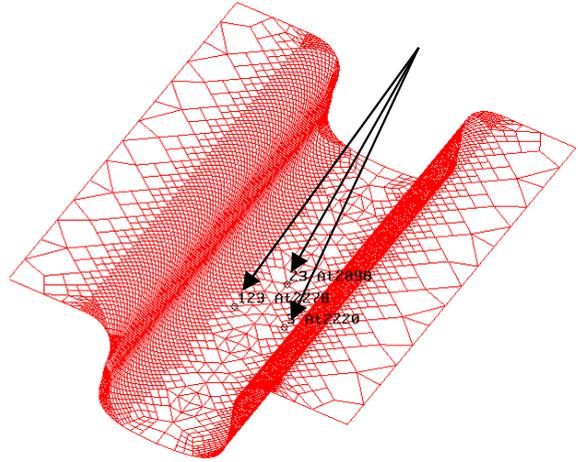


รูปที่ 5 Drawbead (a) Line Drawbead บน Die (b) รูปร่างเรขาคณิตเบื้องต้นของ Drawbead

แบบอินทิเกรตลดรูป (Reduced-Integrated Element) และทำการปรับเปลี่ยน NIP ให้เป็น 7 จุด เพื่อให้สามารถคำนวณการกระจายตัวของความเค้นตามแนวความหนาของโลหะแผ่นเป็นไปได้อย่างถูกต้องเพียงพอ

ในการจำลองสถานการณ์การสปริงตัวกลับนั้น จำเป็นจะต้องกำหนดเงื่อนไขบังคับ (Constraints) อย่างน้อย 3 จุด ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจุดแรกกำหนดให้ $Dx=Dy=Dz=0$ จุดที่สองกำหนดให้ $Dy=Dz=0$ และจุดที่สามกำหนดให้ $Dz=0$ เพื่อป้องกันการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Rotation) นอกจากนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Implicit มีเสถียรภาพ (Stable) จึงได้ทำการเลือกการคำนวณเป็นแบบหลายขั้นตอน (Multi-Step) โดยการค่อยๆ ปลดปล่อยพลังงานความเครียด (Strain Energy) ที่สะสมอยู่ ออกเป็นสัดส่วน เช่น ระยะเวลา 25% เป็นต้น

ภายหลังจากการพยากรณ์การสปริงตัวกลับด้วย FEM แล้วจำเป็นต้องเก็บข้อมูลเพื่อประมวลเป็นมุม θ_1 และ θ_2 ในรูปที่ 2 โดยเก็บข้อมูล 3 จุดดังแสดงใน



รูปที่ 6 การกำหนดเงื่อนไขบังคับ

รูปที่ 7 บนระนาบก่อนและหลังการสปริงตัวกลับ เพื่อมาสร้างสมการระนาบ Π_1 และ Π_2 ตามลำดับ และมุม θ ตามสมการที่ (2) - (4) ในการคำนวณสามารถกำหนด $d=1$ ขณะที่การเลือกเก็บข้อมูล 3 จุดนั้นต้องเลือกให้อยู่บนระนาบเดียวกัน

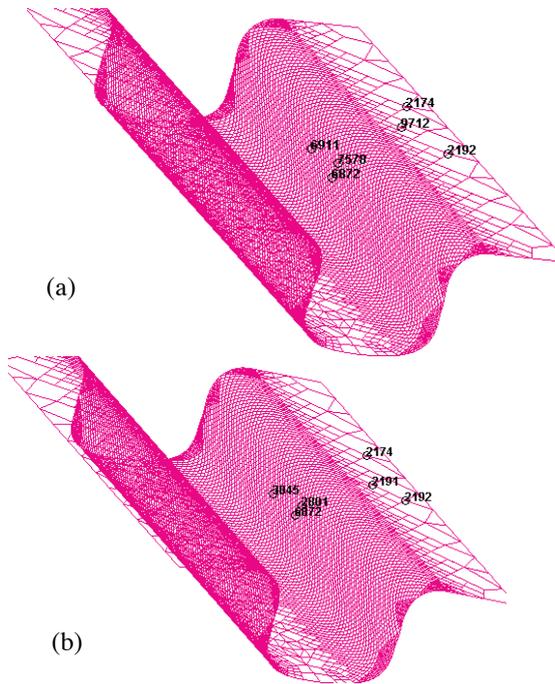
$$\Pi_1 : a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \quad (2)$$

$$\Pi_2 : a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \quad (3)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2} \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}} \right) \quad (4)$$

4. ผลการวิเคราะห์

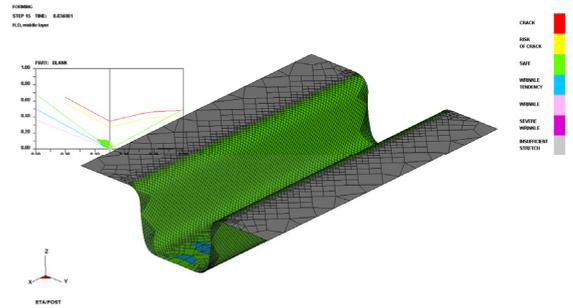
ก่อนทำการวิเคราะห์การพยากรณ์การสปริงตัวกลับนั้น จำเป็นต้องทำการศึกษาผลที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปก่อน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของบทความนี้ในการแสดงผลกระทบของ Drawbead ต่อการเกิดการสปริงตัวกลับและข้อดีข้อเสียของ Drawbead ในการขึ้นรูป จึงได้พิจารณาผลกระทบต่อความสามารถในการขึ้นรูปได้ (Formability) จากช่วงการขึ้นรูปก่อนแล้วจึงดูผลกระทบต่อ การสปริงตัวกลับต่อไป



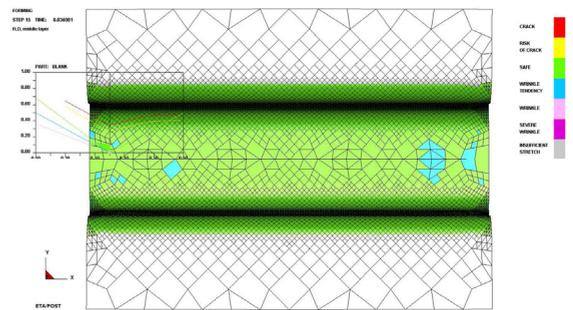
รูปที่ 7 การเก็บพิกัดเพื่อคำนวณมุมที่เปลี่ยนไป (a) Before Springback (b) After Springback

เพื่อให้การรายงานผลกระชับจากกรณี P00-P100 จะได้เริ่มแสดงผลที่กรณี P40 ซึ่งแสดงผล Formability เมื่อเทียบกับแผนภูมิขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram หรือ FLD) ในรูปที่ 8 เห็นได้ว่ากรณี P40 นี้การขึ้นรูปเป็นไปได้ด้วยดี สภาวะมีเอลิเมนต์ทั้งหมดอยู่ภายในเส้นขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Curve หรือ FLC) ทั้งหมด และเมื่อมองจากมุมมองด้านบนดังแสดงในรูปที่ 9 ก็จะทำให้เห็นว่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุอย่างสม่ำเสมอยังคงความเป็น Plane Strain ได้ดี

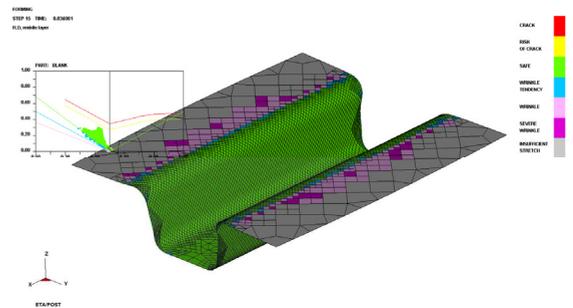
ขณะที่กรณี P70 เมื่อมองที่ Formability เช่นเดียวกันแล้ว ก็ยังพบว่าสภาวะการขึ้นรูปก็ยังคงอยู่ในภาวะที่ยอมรับได้ เอลิเมนต์อยู่ภายใต้ FLC แต่ก็ใกล้ถึงขีดจำกัดแล้วดังแสดงในรูปที่ 10 เมื่อมองจากมุมมองด้านบนดังแสดงในรูปที่ 11 ก็จะพบว่ามีการเปลี่ยนรูปไปอย่างมาก ไม่สม่ำเสมอ ขาดความเป็น Plane Strain ค่อนข้าง



รูปที่ 8 การเปลี่ยนรูปกรณี P40 เมื่อเทียบกับ FLD



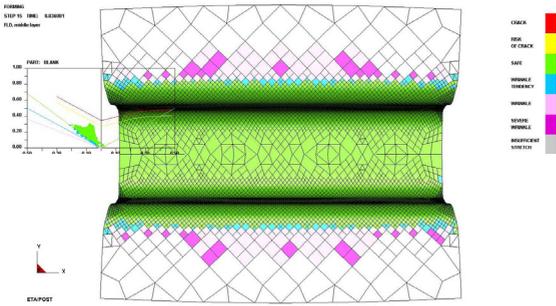
รูปที่ 9 การเปลี่ยนรูปกรณี P40 จากมุมมองด้านบน



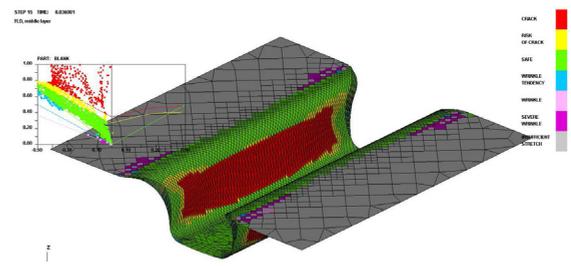
รูปที่ 10 การเปลี่ยนรูปกรณี P70 เมื่อเทียบกับ FLD

มากอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแรงจับยึดจาก Drawbead มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

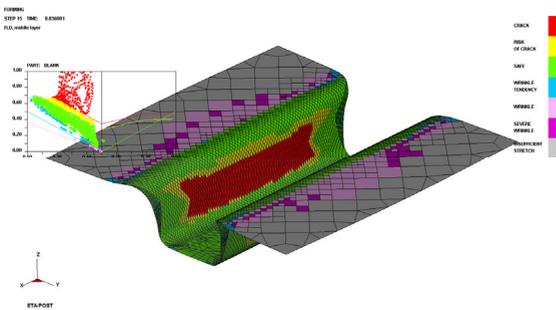
ขณะที่กรณี P80 นั้น เมื่อมอง Formability เช่นเดียวกันแล้ว ก็จะมีแนวโน้มฉีกขาด (Tearing) สูง เนื่องจากสภาวะอยู่เหนือจาก FLC อย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 12 เพราะ Blank ถูกจับยึดที่ Binder มากยิ่งขึ้น ซึ่งกรณี P90 และ P100 ก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ



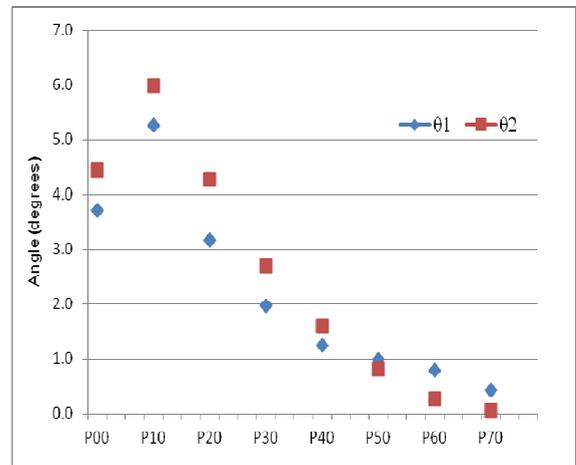
รูปที่ 11 การเปลี่ยนรูปกรณี P70 จากมุมมองด้านบน



รูปที่ 13 การเปลี่ยนรูปกรณี P100 เมื่อเทียบกับ FLD



รูปที่ 12 การเปลี่ยนรูปกรณี P80 เมื่อเทียบกับ FLD



รูปที่ 14 มุม θ_1 และ θ_2 สำหรับกรณี P00-P70

ฉีกขาดไม่สามารถขึ้นรูปได้ ถึงแม้ว่าบทความนี้จะเน้นไปที่การสปริงตัวกลับ แต่กระบวนการขึ้นรูปที่เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการสปริงตัวกลับนั้นจำเป็นต้องคำนึงไปด้วยกัน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อ การสปริงตัวกลับอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ดังแสดงต่อไป

กรณี P100 ก็มีแนวโน้มการฉีกขาดเช่นเดียวกัน เห็นได้ว่ามีแรงการยึด Blank ที่สูงมาก ทำให้ Blank ไหลลงตาม Punch ได้ยากมาก หรือเหลืออยู่บน Binder เป็นหลัก ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของโลหะที่บริเวณผนังสูงมากดังแสดงในรูปที่ 13 และนำไปสู่การฉีกขาดในลำดับต่อมา

ผลการวิเคราะห์การสปริงตัวกลับสำหรับกรณี P00-P70 จะแสดงในตารางที่ 1 และ รูปที่ 14 สำหรับกรณี P80-P100 นั้นไม่ได้แสดงผลการสปริงตัวกลับ เพราะว่

กรณีดังกล่าวล้มเหลวตั้งแต่ขั้นตอนการขึ้นรูปแล้ว ในตารางที่ 1 แสดงค่ามุม θ_1 และ θ_2 หรือ Springback Angle พร้อมด้วยรูปร่าง (Profile) ก่อนและหลังการสปริงตัวกลับ สำหรับ Profile ก่อนการสปริงตัวกลับอาจจะเห็นได้ไม่ชัดเจน แต่สามารถอ้างอิงกรณี P70 ไปพลางได้ก่อน เนื่องจากเกิดการสปริงตัวกลับในกรณีดังกล่าว น้อยมาก จากรูปที่ 14 จะเห็นว่าโดยรวมการสปริงตัวกลับมีแนวโน้มลดลงเมื่อแรงจับยึดจาก Drawbead มีค่ามากขึ้น ขณะเดียวกันจากการวิเคราะห์ผลกระทบจาก Drawbead ต่อ Formability ที่ผ่านไปแล้ว ก็จะพบว่า การเพิ่มขึ้นของแรงจับยึดจาก Drawbead จะเพิ่มแนวโน้มการฉีกขาดให้มากขึ้น



ตารางที่ 1 มุม θ_1 และ θ_2 (องศา) และ Profile

Case	θ_1	θ_2	Profile
P00	3.702	4.444	
P10	5.267	5.994	
P20	3.171	4.278	
P30	1.963	2.689	
P40	1.247	1.588	
P50	0.991	0.808	
P60	0.790	0.261	
P70	0.423	0.048	
P80	Cannot Form		N/A
P90	Cannot Form		N/A
P100	Cannot Form		N/A

5. อภิปรายผลและสรุป

การสปริงตัวกลับมีผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพของงานขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยเฉพาะกับการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น กรณีถ้าเกิดการสปริงตัวกลับเป็นมุม 2° กับโครงสร้างที่ยาว 50 cm จะทำให้ตำแหน่งโครงสร้างผิดไปได้มากถึง 17.5 mm ซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในขั้นตอนการประกอบต่อไป นอกจากนี้ความสำคัญของหัวข้อการสปริงตัวกลับยังได้รับความสนใจในระดับนานาชาติ เช่น NUMISHEET2005 เป็นต้น ที่ให้ความสำคัญต่อปัญหาเปรียบเทียบ (Benchmark Problems) โดยมุ่งไปที่การพยากรณ์การสปริงตัวกลับ จากรายงานวิเคราะห์สรุปใน [9], [10]

การประยุกต์ใช้ Drawbead เพื่อควบคุมการสปริงตัวกลับนั้น คล้ายกับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) เพราะว่าเมื่อเพิ่มแรงจับยึดของ Drawbead ไปถึงจุดหนึ่ง แม้ว่าจะช่วยเรื่องการสปริงตัวกลับได้ แต่ก็ทำให้เกิดข้อเสียอื่นๆ ตามมา เช่น การฉีกขาด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาจุดเหมาะสมที่สุดของแต่ละกรณี และเมื่อได้แรงจับยึดของ Drawbead ที่เหมาะสมแล้ว จึงจะได้นำเอาค่าที่ได้ไปแปลงเป็นรูปร่าง Drawbead ที่เหมาะสมต่อไป อย่างไรก็ตามในบางการขึ้นรูปนั้น การสปริงตัวกลับก็อาจจะไม่ใช่ประเด็นสำคัญอะไรนัก เพราะมีปัจจัยจากกระบวนการดัดน้อย เช่น งานขึ้นรูปด้วย Tube Hydroforming (THF) ใน [11]

จากการสังเกตรูปร่างที่ได้จากการขึ้นรูปในตารางที่ 1 จะพบว่าที่บริเวณขอบของ Blank บริเวณที่เป็นรางจะไม่เรียบตรงนัก ซึ่งคาดว่าเป็นสาเหตุมาจาก Anisotropy ของโลหะแผ่น ประกอบกับความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองเนื่องจากการทำ Mesh ที่ไม่ได้เป็นตารางโดยสมบูรณ์ ทำให้ขอบที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตามแต่กับส่วนที่ลึกเข้าไปนั้นจะสม่ำเสมอเป็นเส้นตรง ดังนั้นการเก็บพิกัดในการสร้างระนาบดังรูปที่ 7 จึงทำให้ Error ดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อไป รูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่า θ_2 มีแนวโน้มลดลงเร็วกว่า θ_1 เพราะว่าจะอยู่ในตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากแรงจับยึดของ Drawbead โดยตรงมากกว่า

ในการจำลองสถานการณ์การสปริงตัวกลับนั้น มีข้อสังเกตบางประการว่าการทำ Seamless Simulation โดยที่ใส่คำสั่ง Input File เพียงชุดเดียวสำหรับทั้งกระบวนการขึ้นรูปและสปริงตัวกลับนั้นยังมีข้อบกพร่องอยู่ทำให้การพยากรณ์ไม่สมบูรณ์ การวิเคราะห์แบบแยกส่วนโดยใช้ฐานข้อมูลในไฟล์ *.dynain นำเข้ามาที่หลังเพื่อสร้าง Springback Simulation นั้นจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่า

เป็นที่น่าสังเกตว่าความแม่นยำของการพยากรณ์การสปริงตัวกลับขึ้นกับปัจจัยหลายๆ ประการ ไม่ได้จำกัดเฉพาะขั้นตอนการสปริงตัวกลับเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับการควบคุมกระบวนการขึ้นรูปด้วย เนื่องจากการควบคุมสภาวะแรงจับยึดของ Blank ทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นการนำไปใช้จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอน (Uncertainty) จากปัจจัยดังกล่าวด้วย

ในท้ายที่สุดบทความนี้แสดงให้เห็นว่า Drawbead สามารถเป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยควบคุมการสปริงตัวกลับได้ไปพร้อมกับการควบคุมคุณภาพความสามารถในการขึ้นรูปของรางตัว และงานขึ้นรูปโลหะแผ่นอื่นๆ ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สัญญาเลขที่ MRG-WI51S156 ทั้งนี้ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และขอขอบคุณการสนับสนุนโปรแกรม Dynaform และ LS-DYNA จาก Engineering Technology Associates Inc. (USA).

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Cao, Z. Liu, and W.K. Liu, "On the structure aspect of springback in straight flanging," *Symposium on Advances in Sheet Metal Forming, 1999 ASME Winter Conference*, 1999.



- [2] K.P. Li, W.P. Carden, and R. H. Wagoner, "Simulation of springback," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.44, pp. 103-122, 2002.
- [3] R. H. Wagoner and M. Li, "Simulation of springback: Through-thickness integration," *International Journal of Plasticity*, vol.23, no.3, pp. 345-360, 2007.
- [4] T. Buranathiti and A. Kositpipat, "A parametric sensitivity study to springback prediction in U-channel forming," *The Journal of King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok*, vol. 16, no. 3, pp.14-18, 2006 (in Thai).
- [5] T. Buranathiti and J. Cao, "An Effective Analytical Model for Springback Prediction in Straight Flanging Processes," *the International Journal of Materials & Product Technology*, vol. 21, 1/2/3, pp. 137-153, 2004.
- [6] ETA, 2010, Dynaform: User's Manual Version 5.7.3.
- [7] LSTC, 2007, LS-DYNA: Keyword User's Manual, Version 971.
- [8] T. Belytschko, J.I. Lin, and C.S. Tsai, "Explicit algorithms for one point quadrature shell element," *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 42, pp. 225-251, 1984.
- [9] T. Buranathiti and J. Cao, "NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Deck Lid Inner Panel: Benchmark 1," *NUMISHEET 2005, Detroit, MI*, pp. 996-1003, August 15-19, 2005.
- [10] T. Buranathiti and J. Cao, "NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Underbody Cross Member: Benchmark 2," *NUMISHEET 2005, Detroit, MI*, pp. 1113-1120, August 15-19, 2005.
- [11] S. Chaemcharoen and P. Thanakijkasem, "Effect of Pressure Profile to Formability of Auto Parts in Tube Hydroforming," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol.19, no. 3, pp.367-375, 2010 (in Thai).