

การศึกษาความไวของตัวแปรต่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปร่างด้วย A Parametric Sensitivity Study to Springback Prediction in U-Channel Forming

ทวีภัทร บุรณนิตติ* และ อาณัติ โฆษิตพิพัฒน์**

บทคัดย่อ

การสปริงตัวกลับเป็นปัญหาหลักสำคัญหนึ่งในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นในอุตสาหกรรมหลายๆ กลุ่ม เช่น กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ปรากฏการณ์สปริงตัวกลับนี้เป็นผลลัพธ์หนึ่งจากการกระจายตัวของความเค้นที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวความหนาของแผ่น และสมบัติคืนตัวยืดหยุ่นของวัสดุ แบบจำลองเชิงวิเคราะห์หรือแบบจำลองเชิงตัวเลขอาจถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับในการออกแบบแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติทั่วไปสำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม แบบจำลองเชิงตัวเลขเป็นที่สนใจมากกว่าแบบจำลองเชิงวิเคราะห์ บทความนี้ได้เน้นไปที่การศึกษาความไวของตัวแปรเชิงตัวเลขที่จำเป็นต่อการสร้างแบบจำลองการพยากรณ์การสปริงตัวกลับ การขึ้นรูปร่างด้วยได้ถูกนำเสนอเป็นกรณีศึกษา จากการศึกษาพบว่าจำนวนจุดอินทิเกรตมีผลกระทบอย่างมีนัยยะต่อความแม่นยำของการพยากรณ์ การคำนวณด้วยความละเอียดสูงเท่านั้นไม่ได้ให้ความแม่นยำที่เพิ่มขึ้นในกรณีศึกษานี้ นอกจากนี้เอลิเมนต์ที่อินทิเกรตแบบเต็มรูปให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเอลิเมนต์ที่อินทิเกรตแบบลดรูป บทความนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าแนวทางการสร้างแบบจำลองในบทความนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในธุรกิจขึ้นรูปโลหะแผ่นต่อไป

คำสำคัญ : การสปริงตัวกลับ การขึ้นรูปร่างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาความไว

Abstract

Springback is an important major problem in sheet metal fabrications in many industries such as automobile industry. Springback phenomenon is a result of uneven stress distribution along sheet thickness and elastic recovery property of the material. To predict springback in tooling design, one may use analytical models or numerical models. However, in most practical industrial applications, numerical models are of interest rather than an analytical one. This paper focuses on a sensitivity analysis of numerical parameters needed in modeling to springback prediction. A U-channel forming is provided as the case study. It is found that the number of integration points has significant effect to the prediction accuracy. The computation in double precision does not provide a better accuracy in this case study. In addition, a fully-integrated element provides similar prediction to that of the corresponding reduced-integrated element. It is hoped that the modeling guideline provided in this paper will benefit the industrial community to further apply in the sheet metal fabrication business.

Keywords : Springback, U-Channel Forming, Finite Element Method, Sensitivity Study

* อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

** นักศึกษา หลักสูตรการออกแบบและผลิตแบบบูรณาการ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. บทนำ

การสปริงตัวกลับ (Springback) เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่าง (Shape Change) ของชิ้นงาน (Work-piece) ภายหลังจากการขึ้นรูป (Forming) หรือปล่อยแรงกระทำออก (Unloading) ปัญหาการสปริงตัวกลับนี้ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญมากโดยเฉพาะกับการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมุมเพียงเล็กน้อย สามารถทำให้เกิดระยะพิถีพิถันผลผลิตที่สูงได้ ทำให้จำเป็นต้องมีการออกแบบและแก้ไขแม่พิมพ์ที่ซับซ้อนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามรูปร่างที่ต้องการ

วิธีการพยากรณ์การสปริงตัวกลับ (Springback Prediction Methodology) นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ (1) แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ (Analytical Model) และ (2) แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model) ทั้งนี้การเปรียบเทียบประสิทธิผล (Effectiveness) ของแบบจำลองมักทำได้โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองซึ่งผลการทดลองที่ถูกนิยมนำมาเปรียบเทียบบ่อยๆ คือ งานของ Wang [1] และ Liu [2] ซึ่งทั้งสองงานนี้ได้ทำการศึกษารูปที่ขึ้นรูปโดยการทำมุม 90 องศาอย่างง่าย นอกจากนี้ก็มีงานของ Muderrisoglu *et al.* [3] และ Livatyali and Altan [4] ที่ได้ทำการทดลองและก็เป็นการศึกษาโดยการทำมุม 90 องศาเช่นเดียวกัน ทั้งนี้มีการสรุปแนวโน้มตัวแปรกระบวนการที่จะมีผลต่อขนาดของการสปริงตัวกลับ พอสังเขป

แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ที่มีศักยภาพเริ่มจากงานของ Wang [1] ซึ่งพิจารณาตัวแปรที่สนใจเพียงไม่กี่ตัวแปรแล้วได้มีการพัฒนาการเป็นแบบจำลองที่มีความสมบูรณ์ขึ้นใน Song *et al.* [5] และแบบจำลองของ Buranathiti and Cao [6] ที่ไม่ใช้ตัวแปรปรับแก้ (Correction Factor) ที่มาจากผลการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) เป็นความสัมพันธ์อย่างง่าย (Empirical Relation) ใน Song *et al.* [5]

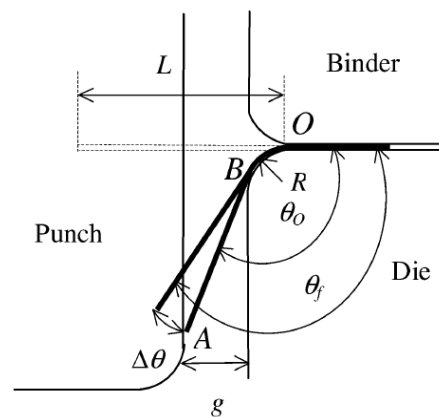
สำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นก็ได้อีกมีนักวิจัยจำนวนมากทำงานทางด้านนี้ ซึ่งงานของ Cao *et al.* [7] ได้ลองใช้วิธีไม่มีเอลิเมนต์ (Element Free Method) มาพยากรณ์การสปริงตัวกลับ งานของ Li *et al.* [8] ที่ได้ทำการศึกษาคำไวของตัวแปรต่อความแม่นยำของการพยากรณ์การสปริงตัวกลับที่เน้นไปที่จำนวนจุดอินทิเกรตว่ามีผลอย่างไร ซึ่งได้สรุปว่าควรมีจำนวนตั้งแต่ 25 ถึง 51 ถ้าต้องการให้การพยากรณ์ดีในกรณีส่วนใหญ่ และงาน

ของ Wagoner and Li [9] ที่มุ่งเน้นไปที่การพิสูจน์ว่าจำนวนจุดอินทิเกรตมีผลต่อความแม่นยำในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับโดยใช้แบบจำลองคาน (Beam Model) อย่างง่ายภายใต้แรงดึง มาทำการอินทิเกรตโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Integration) และวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Integration)

ในการพยากรณ์การสปริงตัวกลับนั้น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่กระนั้นการเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมก็มีผลกระทบโดยตรงต่อความแม่นยำของการพยากรณ์ เช่น ชนิดของเอลิเมนต์ จำนวนจุดอินทิเกรต ตามแนวความหนาของโลหะแผ่น ขนาดของเอลิเมนต์ ชนิดของวัสดุ คาร์ซีมีขอบมุมของแม่พิมพ์ เป็นต้น บทความนี้จะจึงได้ทำการศึกษาความไว (Sensitivity) ของตัวแปรที่มีผลต่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับ ในการขึ้นรูปรางตัวยู (U-channel) โดยเน้นไปที่จำนวนจุดอินทิเกรตตามแนวความหนาของโลหะแผ่น ชนิดของเอลิเมนต์ และจำนวนจุดลอย (Floating-point Number) ในการคำนวณ

2. ปรากฏการณ์สปริงตัวกลับ (Springback Phenomenon)

ปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นกับการขึ้นรูปโลหะแผ่นเสมอ คือ ปรากฏการณ์สปริงตัวกลับ (Springback Phenomenon) โดยเฉพาะกับงานขึ้นรูปที่มีการดัด (Bending) ลักษณะการเกิดการสปริงตัวกลับแสดงให้เห็นในรูปที่ 1 ว่า θ_0 เป็นมุมของโลหะแผ่นที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ดังแสดง หรือเรียกว่าสภาวะก่อนการสปริงตัวกลับ (Before-springback) แต่เนื่องจากสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุและความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัว



รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเกิดการสปริงตัวกลับ [6]

ของความเค้นทำให้โลหะแผ่นมีการสปริงตัวกลับทำให้เกิดเป็นมุม θ_f หรือเรียกว่าสถานะหลังการสปริงตัวกลับ (After-springback) โดยอาจเรียก $\Delta\theta$ ว่ามุมสปริงตัวกลับ (Springback Angle)

ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการนี้คือ ค่าโมเมนต์ดัด (Bending Moment, M) ที่เกิดขึ้นตลอดความหนา t ของโลหะแผ่น ซึ่งแสดงให้เห็นในสมการที่ 1

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

โดยที่ ζ เป็นพิกัดในบริเวณ (Local Coordinate) ตลอดแนวความหนา และ σ เป็นค่าความเค้น (Stress) ซึ่งค่า M นี้จะถูกนำมาคำนวณหาความเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปร่างจากสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ เมื่อมีการปลดปล่อยแรงกระทำออก (Unloading)

3. การขึ้นรูปร่างตัวยู (U-channel Forming)

บทความนี้ได้นำเอาการขึ้นรูปร่างตัวยู (U-channel Forming) มาเป็นกรณีศึกษา เพื่อแสดงพฤติกรรมของการสปริงตัวกลับของการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยแม่พิมพ์ (Die) ที่ใช้ในการศึกษานี้ สามารถทำให้เกิดชิ้นงานที่มีมุมผนังตั้งตรงตามแนวตั้ง (Vertical Wall) คือ มุม 90 องศา ก่อนการสปริงตัวกลับหลังจากนั้นก็ทำการวัดมุมที่เปลี่ยนแปลงไป

โลหะแผ่น (Blank) ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีขนาดกว้าง x ยาว โดยประมาณ 150×140 มม. และมีความหนา 1 มม. ทั้งนี้แม่พิมพ์กำหนดให้มีรัศมีมุมของแม่พิมพ์ที่ประมาณ 5 มม.

การขึ้นรูปร่างตัวยูนี้ สามารถทำได้โดยการนำเอาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Model) มาประยุกต์ใช้จำลองสถานการณ์การขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยทั้งกระบวนการขึ้นรูปและการสปริงตัวกลับนี้ทำโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ Dynaform และ LS-DYNA โดยวิธีการคำนวณช่วงการขึ้นรูปใช้รูปแบบ Explicit ขณะที่วิธีการคำนวณช่วงสปริงตัวกลับนั้นใช้รูปแบบ Implicit การคำนวณทั้งหมดทำบน PC workstation ที่มีตัวประมวลผล Intel Xeon 3.2 GHz และ RAM ที่ 1 GB

วัสดุที่ใช้ในกรณีศึกษานี้คือ เหล็กกล้า DQSK ที่มีความหนาแน่น 7850 kg/m^3 ค่ามอดูลัสของ Young (E) ที่

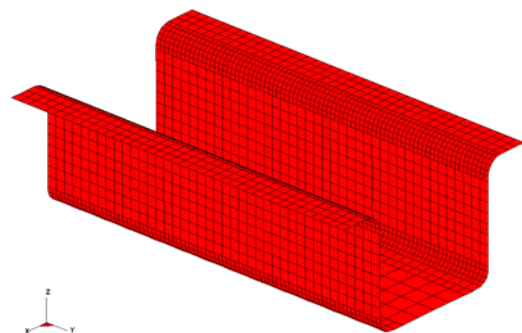
207 GPa ค่าอัตราส่วนของ Poisson (ν) ที่ 0.28 โดยที่วัสดุ มีพฤติกรรมพลาสติกตามกฎของ Hollomon ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength coefficient, K) ที่ 520.4 MPa ค่ายกกำลังแข็ง (hardening exponent, n) ที่ 0.232 ตามสมการที่ 2 ทั้งนี้มีค่าตัวแปรความไม่เป็นทิศทางเดียว (anisotropy parameter, R) ที่ $R_{00}=1.73$ $R_{45}=1.35$ และ $R_{90}=2.18$ ใช้เงื่อนไขการคราก (yield criterion) ที่มีสัมประสิทธิ์ยกกำลัง $m = 6$

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

ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการขึ้นรูปนี้ใช้เอลิเมนต์โครงสร้างแบบเปลือก (Shell) ในการอินทิเกรตแบบลดรูปตามแบบของ Belytschko *et al.* [10] ที่มีจำนวนจุดอินทิเกรตตามแนวความหนา (Number of Integration Points, NIP) เป็น 5 จุด กำหนดให้มีการปรับเปลี่ยนตาข่าย (Mesh Adaptivity) ได้ 3 ระดับ (Level)

ทำการเคลื่อนแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยแรงประสาน (Binder Force) โลหะแผ่น ที่ 20 kN และเคลื่อนที่ตัวหัวกด (Punch) ที่ความเร็ว 1,000 mm/s ทั้งนี้เพื่อไม่ให้ใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไป ให้ได้ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2

นำไฟล์ข้อมูลของกระบวนการขึ้นรูปซึ่งอยู่ในรูปแบบ *.Dynaform เข้ามาเพื่อทำการวิเคราะห์การสปริงตัวกลับ (Springback) เนื่องจากบทความนี้สนใจการสปริงตัวกลับมากกว่าช่วงกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นต่อไปนี้จะใช้ข้อมูลแบบจำลองขั้นตอนการขึ้นรูปแบบเดียวกันแล้วทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรเชิงตัวเลขเพื่อทำการศึกษาดังนี้ โดยทำการปรับปรุงเฉพาะชนิดของเอลิเมนต์ให้เป็นแบบอินทิเกรตเต็มรูป (Fully-integrated Element; FI) หรือให้คงแบบอินทิเกรตลดรูป (Reduced-integrated Element; RI) ทำการปรับเปลี่ยน NIP ให้เป็น 5, 7, 11, และ 51 จุด และทำการทดสอบการคำนวณแบบ



รูปที่ 2 แสดงชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปให้เป็นรางตัวยู

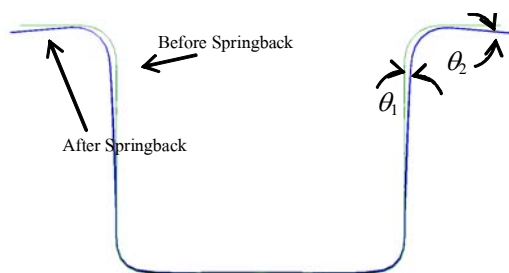
ละเอียดปกติ (Single Precision; SP) และแบบละเอียดสองเท่า (Double Precision; DP)

ในการจำลองสถานการณ์การสปริงตัวกลับนั้นจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขบังคับ (Constraints) อยู่อย่างน้อย 3 จุด โดยจุดแรกกำหนดให้ $DX=DY=DZ=0$ จุดที่สองกำหนดให้ $DY=DZ=0$ และจุดที่สามกำหนดให้ $DZ=0$ เพื่อป้องกันการหมุนของวัตถุแบบแข็งเกร็ง (Rigid Body Rotation) นอกจากนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ด้วยวิธี Implicit มีเสถียรภาพ (Stable) จึงได้ทำการเลือกคำสั่งทำเอลิเมนต์ให้หยาบขึ้น (Coarsening) เพื่อเชื่อมหรือรวมเอลิเมนต์เล็กๆ ที่เกิดจากขั้นตอนการขึ้นรูปเข้าไว้ด้วยกันจาก Mesh Adaptivity และการคำนวณการสปริงตัวกลับเป็นแบบหลายขั้นตอน (Multi-step) โดยการค่อยๆ ปลดปล่อยพลังงานความเครียด (Strain Energy) ที่สะสมอยู่ออกเป็นสัดส่วน เช่น ระยะเวลา 10% เป็นต้น

4. ผลการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์การสปริงตัวกลับนั้น ในเบื้องต้นสามารถเห็นถึงตัวแปรดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเส้นบางแสดงรูปร่างของรางตัวยูก่อนการสปริงตัวกลับ และเส้นหนาแสดงรูปร่างของรางตัวยูภายหลังการสปริงตัวกลับ โดยขนาดของการสปริงตัวกลับดูได้จากขนาดของมุมที่เปลี่ยนไปจากเดิม โดยในที่นี้จะพิจารณามุม 2 มุม คือ θ_1 และ θ_2 ทั้งนี้จากการสมมาตรของแบบจำลอง

ค่ามุมสปริงตัวกลับทั้งสองตัวนี้จะถูกนำมารวบรวมเพื่อพิจารณาถึงความไว (Sensitivity) ของตัวแปรเชิงตัวเลขที่มีต่อการพยากรณ์การสปริงตัวกลับ (Springback) ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการวิเคราะห์จึงได้รวบรวมข้อมูลทางด้านเวลาที่ใช้ในการคำนวณไว้ด้วย ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 1



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการเกิดสปริงตัวกลับในการขึ้นรูปร่างตัวยู

ตารางที่ 1 แสดงค่าอธิบายแบบจำลอง ค่ามุมสปริงตัวกลับ (องศา) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)

ที่	คำอธิบาย	θ_1	θ_2	เวลาคำนวณ
1	RI, SP, NIP = 5	2.41	5.6	84
2	RI, SP, NIP = 7	2.08	5.2	52
3	RI, SP, NIP = 11	2.07	5.2	96
4	RI, SP, NIP = 51	2.12	5.3	182
5	RI, DP, NIP = 5	2.31	5.6	210
6	RI, DP, NIP = 7	2.08	5.2	91
7	FI, SP, NIP = 5	2.33	5.6	84
8	FI, SP, NIP = 7	2.08	5.2	51
9	FI, SP, NIP = 11	2.07	5.2	96
10	FI, SP, NIP = 51	2.12	5.3	189
11	FI, DP, NIP = 5	2.31	5.6	211
12	FI, DP, NIP = 7	2.08	5.2	88

5. อภิปรายผล

การวิเคราะห์การสปริงตัวกลับได้ในงานขึ้นรูปโลหะแผ่นถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก โดยเฉพาะกับการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยอาจเปรียบเทียบกับกรณีโครงสร้างที่ยาว 1 เมตร ได้ว่าถ้ามีมุมสปริงตัวกลับ 2 องศาแล้ว จะทำให้ตำแหน่งโครงสร้างผิดไปได้มากถึง 34.9 มม. เลยทีเดียว นอกจากนี้สามารถเห็นความสำคัญของหัวข้อการสปริงตัวกลับได้จากเวทีวิจัยในระดับนานาชาติ เช่น NUMISHEET2005 เป็นต้น ที่ให้ความสำคัญต่อปัญหาเปรียบเทียบ (Benchmark Problem) โดยมุ่งไปที่การพยากรณ์การสปริงตัวกลับ ดังเห็นได้จากรายงานวิเคราะห์สรุปใน Buranathiti and Cao [11-12]

จากตารางที่ 1 พบว่าเอลิเมนต์ที่อินทิเกรตแบบเต็ม (Fully-integrated Element) ให้การพยากรณ์ค่าสปริงตัวกลับที่ใกล้เคียงกับ เอลิเมนต์ที่อินทิเกรตแบบลดรูป

จำนวนจุดลอย (Floating-point Number) เป็นตัวแปรเชิงตัวเลขตัวหนึ่งที่บอกถึงความละเอียดของการคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยในบทความนี้ได้จำแนกออกมาเป็น 2 ส่วน คือ แบบละเอียดปกติ (Single Precision) ที่มีอยู่ 8 หลัก และ แบบละเอียดสองเท่า (Double Precision)

Precision) ที่มีอยู่ 16 หลัก ในส่วนนี้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเป็นการเพิ่มภาระกับการคำนวณอย่างมากถ้าต้องใช้ความละเอียดแบบสองเท่านี้ อย่างไรก็ตามพบว่าความละเอียดที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ได้ให้ผลการพยากรณ์ที่แตกต่างกันนักในกรณีศึกษา

เป็นที่น่าสังเกตว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณการสปริงตัวกลับนี้อาจจะไม่เพิ่มไปตามจำนวนจุดการอินทิเกรตก็ได้ เนื่องจากบางครั้งอาจจะมีการลู่ออกของคำตอบ (Solution Convergence) ที่เร็วกว่า เห็นได้ว่าที่ NIP = 5 ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าที่ NIP = 7 เนื่องจากว่าใช้การคำนวณหลายขั้นตอนมากกว่าที่จะลู่ออกคำตอบได้ โดยประเด็นนี้เป็นลักษณะจำเพาะของ Implicit Scheme ที่จะต้องหาสภาวะสมดุลไปเรื่อยๆ ดังนั้นเวลาที่ใช้ก็จะขึ้นอยู่กับว่า คำตอบจะลู่ออกเร็วหรือเปล่า ซึ่งต่างจาก Explicit Scheme ซึ่งมีการกำหนดจำนวนขั้นตอนการคำนวณไว้ได้ล่วงหน้า

การที่เลือกใช้ NIP เป็นเลขคู่เนื่องจากต้องการให้การอินทิเกรตมีจุดหนึ่งอยู่ไกลบริเวณแกนกลาง (neutral axis) เพื่อให้การอินทิเกรตความเค้นที่กระจายตลอดความหนาของโลหะแผ่นที่คานที่ถูกดัด จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่า NIP = 5 นั้นไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์การสปริงตัวกลับ ควรเริ่มต้นใช้ตั้งแต่ที่ NIP = 7 สำหรับการใช้อัตราจุดถึง NIP = 51 นั้นใช้เวลาคำนวณมากกว่า 7 จุด ถึง 3 เท่า แต่ได้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ก็จะต้องขึ้นกับทรัพยากรการคำนวณที่มีอยู่ว่ามีมากเพียงใด แต่ก็ควรจะเริ่มตั้งแต่ 7 จุดขึ้นไป

6. กิตติกรรมประกาศ

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

เอกสารอ้างอิง

1. Wang, N.M. "Predicting the effect of die gap of flange springback." Proceedings of 13th Biennial IDDRG Congress, 133-147. Melbourne, Australia, 1984.
2. Liu, Y. C. "Springback reduction in U-channels: 'double-bend' technique." Journal of Applied

Metalworking, 3, 2 (1984) : 148-156.

3. Muderrisoglu, A., et al. "Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet: an experimental study." Journal of Materials Processing Technology. 59 (1996) : 10-17.
4. Livatyali, H. and Altan, T. "Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer-aided design methods Part 1: experimental investigations." Journal of Materials Processing Technology. 117 (2001) : 262-268.
5. Song, N., et al. "Effective prediction of springback in straight flanging." Journal of Engineering Materials and Technology. 123, 4 (2001) : 456-461.
6. Buranathiti, T. and Cao, J. "An Effective Analytical Model for Springback Prediction in Straight Flanging Processes." the International Journal of Materials & Product Technology. 21, 1/2/3 (2004) : 137-153.
7. Cao, J., Liu, Z. and Liu, W.K. "On the structure aspect of springback in straight flanging." Symposium on Advances in Sheet Metal Forming. ASME Winter Conference, 1999.
8. Li, K.P., Carden, W.P. and Wagoner, R. H. "Simulation of springback." International Journal of Mechanical Sciences. 44 (2002) : 103-122.
9. Wagoner, R. H. and Li, M. "Simulation of springback: Through-thickness integration." International Journal of Plasticity. 23, 3 (2007) : 345-360.
10. Belytschko, T., Lin, J.I. and Tsai, C.S. "Explicit algorithms for one point quadrature shell element." Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering. 42 (1984) : 225-251.
11. Buranathiti, T. and Cao, J. "NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Deck Lid Inner Panel: Benchmark 1." NUMISHEET 2005, Detroit, MI, 996-1003. August 15-19, 2005.
12. Buranathiti, T. and Cao, J. "NUMISHEET2005 Benchmark Analysis on Forming of an Automotive Underbody Cross Member: Benchmark 2." NUMISHEET 2005, Detroit, MI, 1113-1120. August 15-19, 2005.