

การวิเคราะห์ผลกระทบของรัศมีด้านบนของ แม่แบบและอัตราส่วนการขึ้นรูปในกระบวนการดึง ขึ้นรูปลึกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์*

ชัยวัฒน์ ยิ่งสุขวัฒนา¹⁾ สรรพ อินแบน²⁾

1) อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

2) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง
จังหวัดขอนแก่น 40002

Email:Chaiwat2516@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานเมื่อเปลี่ยนรัศมีแม่แบบด้านบนจาก 3 เป็น 3.5 และ 4 มิลลิเมตร การจำลองกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) จากแผ่นจานอลูมิเนียมมีความหนา 0.292 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้น 140 มิลลิเมตร เมื่อใช้อัตราส่วนการขึ้นรูปเป็น 1.57 จะได้ถ้วยทรงกระบอกที่ 89 มิลลิเมตร 34 มิลลิเมตร และ เมื่อใช้อัตราส่วนการขึ้นรูปเป็น 1.33 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสุดท้าย 105 มิลลิเมตร โดย มีความสูง 31 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ถูกใช้เพื่อหาค่าการกระจายตัวของค่าความเค้นและความเครียดของชิ้นงานในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก โดยมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของค่าดังกล่าวดังนี้คือ แรงที่ใช้กดยึดชิ้นงาน (Blank holder force) รูปแบบของวัสดุที่ใช้ (Material's Models) และแรงเสียดทาน (friction force) ที่เกิดขึ้นขณะทำการดึงขึ้นรูปลึก

โดยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ จะถูกนำมาหาความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างระยะกดลึก (Stroke) กับแรงกดที่เกิดขึ้น (Punch Load) และนำผลการวิเคราะห์ไปสรุปเปรียบเทียบกับทฤษฎีของการดึงขึ้นรูปลึก

คำสำคัญ : การดึงขึ้นรูปลึก, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ, อัตราส่วนการขึ้นรูป

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2548 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 18 มกราคม 2549

Analysis of Effect of Upper Die Radius and Limit Drawing Ratio in Deep Drawing Processes Using Finite Element Method

Chaiwat Yingsukwattana¹⁾ Samruad Inban²⁾

1) Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University, Khon Kaen, 40000.

2) Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002.

Email:Chaiwat2516@hotmail.com

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the effects of upper die radius and limit drawing ratio for the deep drawing process in terms of stress and strain distribution. The analysis is performed through the use stress and strain distribution. The analysis is performed through the use of a simulation model based on the finite element method. In the model, a sample of a circular aluminum sheet with an initial diameter of 140 mm and a thickness of 0.292 mm is used. The drawing ratio between the initial diameter and the diameter after the process is chosen to be 1.57: 1.33. Then, the sheet that has gone through the deep drawing process will become a cylindrical shape with diameters of 89 mm and 105 mm and the lengths are 34 mm and 31 mm, respectively. The results of the simulation reveal that the factors that have an impact on stress and strain distribution are blank holder force, material's model, and friction force. The results also suggest the relationship between stress and strain and stroke and punch load.

Keywords : Deep drawing, 3-D Finite Element Method, Limit drawing ratio

*

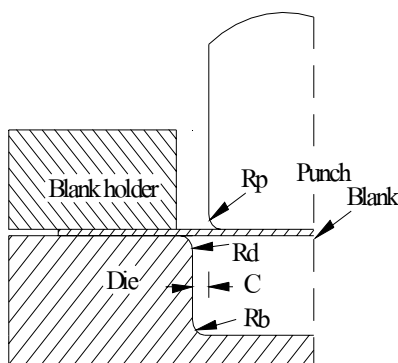
Original manuscript submitted: October 28, 2005 and Final manuscript received: January 18, 2006

บทนำ

ในกระบวนการศึกษาการดัดขึ้นรูปลึกจะนำเอาวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการคำนวณเชิงตัวเลข หรือ การวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถและมีศักยภาพมาประกอบ การศึกษาครั้งนี้โดยจะทำการศึกษาถึงผลกระทบเมื่อเปลี่ยนรัศมีด้านบนของแม่แบบและการเปลี่ยนอัตราส่วนการขึ้นรูปว่า มีผลกระทบอย่างไรกับวัสดุชิ้นงานโดยทำการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุที่มีอิทธิพลต่อการกระจายค่าความเค้นหรือความเครียด ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการศึกษาทั้งการวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ และ การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

รายละเอียดแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปร่างของแบบจำลองของงานวิจัยแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 รูปร่างส่วนสำคัญของแบบจำลองการดัดขึ้นรูปลึก

ขนาดของชิ้นงานและชุดเครื่องมือ

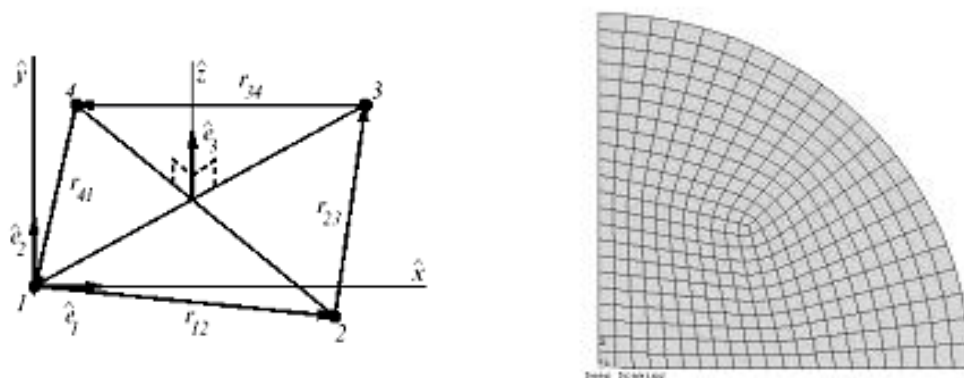
ขนาดของชิ้นงานและชุดเครื่องมือในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงไว้ดังตารางที่ 1

พินช์ (Punch) (mm)	89,105
ดาย (Die) (mm)	91.1,107.1
R_p (mm)รัศมีพินช์	2
R_d (mm)รัศมีด้านบนของแม่แบบ	3, 3.5 และ 4
R_b (mm)รัศมีด้านล่างของแม่แบบ	3
C (mm)ระยะห่างระหว่างพินช์กับแม่แบบ	1.05
ชิ้นงานและความหนา (mm)	Ø140,0.292
แผ่นกดชิ้นงานเป็นรูปวงแหวน (mm)	140
แรงกดยึดชิ้นงาน (kN)	17.5 , 11.8
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)	0.15

ตารางที่ 1 ขนาดของชิ้นงานและชุดเครื่องมือ

เอลิเม้นต์ของชิ้นงานและชุดเครื่องมือ

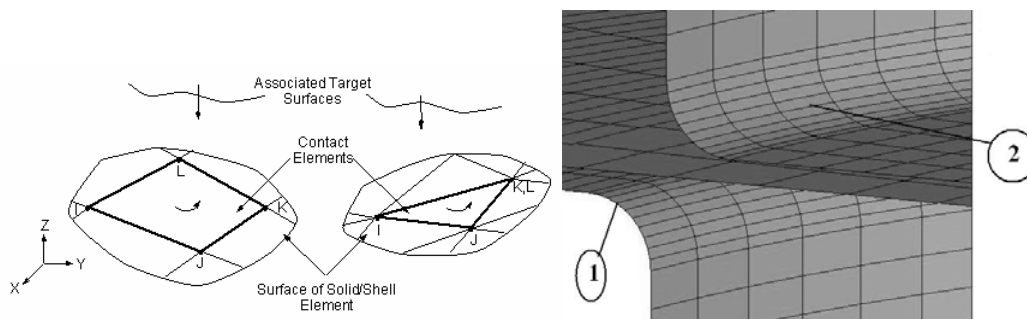
แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเม้นต์ของชิ้นงานและชุดเครื่องมือสร้างจากเอลิเม้นต์แบบเปลือก (Shell) สี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าแบบสี่จุดต่อ (Four-node quadrilateral element) เนื่องจากเป็นเอลิเม้นต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะได้ดี โดยใช้โปรแกรมแกรนคอมพิวเตอรืที่ใช้วิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเม้นต์แบบพลศาสตร์ (ANSYS/LS-DYNA)



รูปที่ 2 รูปร่างของเอลิเม้นต์แบบสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าแบบสี่จุดต่อ และการแบ่งเอลิเม้นต์ให้กับชิ้นงาน

คู่สัมผัส

การศึกษาค้างนี้ เลือกคู่สัมผัสแบบแบบผิวสัมผัสกับผิวสัมผัส (Surface-to-Surface) ในแบบจำลองของการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานและชุดเครื่องมือโดยมีคู่สัมผัสดังต่อไปนี้ คู่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับพื้นซ์ คู่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแม่แบบ และ คู่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแผ่นกดยึดชิ้นงาน โดยการแบ่งเอลิเม้นต์จะเพิ่มจำนวนเอลิเม้นต์ให้มีจำนวนมากขึ้นในบริเวณที่เป็นส่วนโค้ง เช่น ส่วนโค้งของพื้นซ์หมายเลข 2 ส่วนโค้งของแม่แบบ หมายเลข 1 ดังรูปที่3 เพื่อให้ได้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นโดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) 0.15 เพราะมีค่าที่ใกล้เคียงกับกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกจริง (Joel, 1997)



รูปที่ 3 เอลิเม้นต์แบบผิวสัมผัส กับ ผิวสัมผัสในระนาบ 3 มิติ และบริเวณที่เพิ่มจำนวนเอลิเม้นต์ให้กับแบบจำลอง

สมบัติทางกล (Mechanical properties)

สมบัติทางกลของวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

2.4.1 สมบัติทางกลของชิ้นงานสามารถเสียรูปได้(Deformed Body) ซึ่งกำหนดให้เป็นแบบ การเสียรูปอย่างถาวรของวัสดุไอโซโทรปิกตามกฎยกกำลัง ($\sigma = \kappa \varepsilon^n$) ค่าสมบัติทางกลของชุดเครื่องมือแสดงไว้ในตารางที่ 2

2.4.2 สมบัติทางกลของแม่แบบแผ่นกดชิ้นงาน และ พันธ์ เป็นแบบวัตถุเกร็ง(Rigid Body) ซึ่งจะไม่มีการเสียรูป

สมบัติทางกล	ชิ้นงาน	ชุดเครื่องมือ
โมดูลัสของยัง (GPa) E	69	69
ความเค้นคราก (MPa) σ_y	260	260
อัตราส่วนปัวซอง ν	0.34	0.34
ความเค้นดึงสูงสุด (MPa) σ_{ut}	324.11	324.11
ความหนาแน่น (kg / cm^3) ρ	2720	2720
สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง (MPa) κ	348	-
เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด n	0.062	-

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุ

การสร้างแบบจำลอง

ทำการสร้างแบบจำลองหนึ่งในสี่ส่วนดังรูปที่1 โดยมีรายละเอียดของขนาดในตารางที่1 และเลือกเอลิเมนต์ของชิ้นงานและเครื่องมือตามหัวข้อ2.2 และ กำหนดสมบัติของวัสดุทั้งของชิ้นงานและเครื่องมือตามหัวข้อ2.4และตาราง2 และกำหนดเงื่อนไขบังคับดังที่แสดงในรูปที่ 4

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้กับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ ภาระที่กระทำรวมไปถึงข้อบังคับการขจัด และการกำหนดคู่สัมผัสซึ่งแสดงไว้ในรูปที่3 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (อดิสรและคณะ, 2546)

2.5.1 การบังคับการขจัดของแบบจำลองพันธ์ และ แผ่นกดชิ้นงาน คือ $u_x = u_y = 0$ และ

$$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

2.5.2 การบังคับการขจัดของแบบจำลองของชุดแม่แบบ คือ $u_x = u_y = u_z = 0$ และ

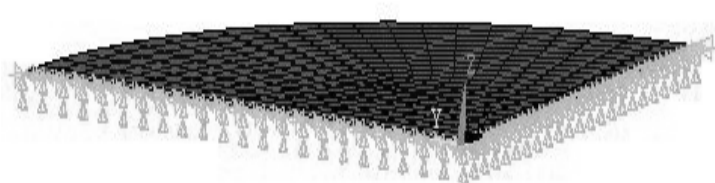
$$\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

2.5.3 การบังคับการขจัดของแบบจำลองของแผ่นจานอลูมิเนียม โดยขอบจำลองด้านระนาบ yz กำหนดให้ $u_x = 0$ และ $\theta_y = \theta_z = 0$ ส่วนขอบด้านระนาบ xz กำหนดให้ $u_y = 0$ และ $\theta_x = \theta_z = 0$

2.5.4 ภาระที่กระทำกับพันธ์ คือ ให้เคลื่อนที่ลงมาในแนวแกน z

2.5.5 ภาระที่กระทำกับแผ่นกดชิ้นงาน 17.5 kN และ 11.8 kN

เมื่อ u_x คือ การขจัดในแนวแกน X
 u_y คือ การขจัดในแนวแกน Y



เมื่อ u_x คือ การขจัดในแนวแกน X
 u_y คือ การขจัดในแนวแกน Y
 u_z คือ การขจัดในแนวแกน Z
 θ_x คือ การหมุนรอบในแนวแกน

θ_y คือ การหมุนรอบในแนวแกน Y
 θ_z คือ การหมุนรอบในแนวแกน Z

รูปที่ 4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตบนชิ้นงาน

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์แบบจำลอง

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะ โดยในการศึกษาครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเอ็กพลีซิท(เจาะฐาและคณะ, 2546) (สังคม, 2545)

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เป็นไปตามกฎยกกำลัง(Power Law)

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

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถเขียนเป็นสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$d\sigma = [D]d\varepsilon \quad (2)$$

โดยที่

$[D]$ เกิดจากผลต่างการเสียรูปในช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติก

$$[D] = [D^e] - [D^p] \quad (3)$$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวในแต่ละเอลิเมนต์โดยที่ไม่คิดความเร่งและความเร็ว

$$[k_i]\{u_i\} = \{f_i\} \quad (4)$$

เมื่อ

$$[k_i] = \int [B_i]^T [D_i] [B_i] dv_i \quad (5)$$

เมื่อเอาทุกเอลิเมนต์มารวมกันเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$[k]\{u\} = \{f\} \quad (6)$$

จากหลักการของดาลองแบร์ต (D'Alembert principle)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^t\} \quad (7)$$

เมื่อ u คือเวกเตอร์ของการเคลื่อนตัว

จากสมการที่ (1) สามารถหาการเคลื่อนตัวที่เวลาใดๆ t นั้นโดยใช้วิธีการผลต่างตรงกลาง(Central Difference Method) ตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปจากสมการ (7)

$$\dot{u}_t = \frac{u_{t+\Delta t} - u_{t-\Delta t}}{2\Delta t} \quad (8)$$

$$\ddot{u}_t = \frac{u_{t+\Delta t} - 2u_t + u_{t-\Delta t}}{(\Delta t)^2} \quad (9)$$

การศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาความเค้นฟอนมิสเสต (Von mises stress) ตามสมการที่ (10) ดังนี้

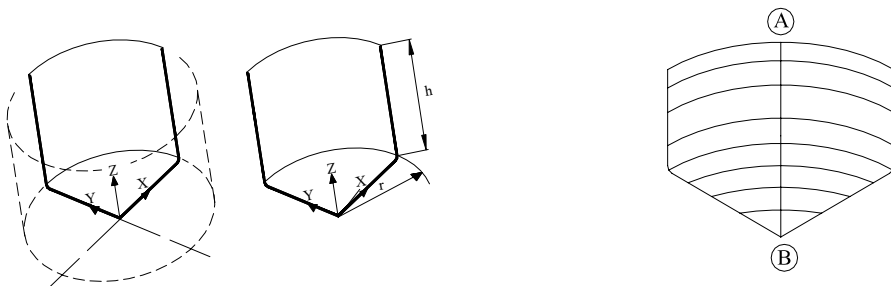
$$2\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (10)$$

โดยที่

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือค่าความเค้นหลักตามแนวแกนที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ผลของการวิเคราะห์

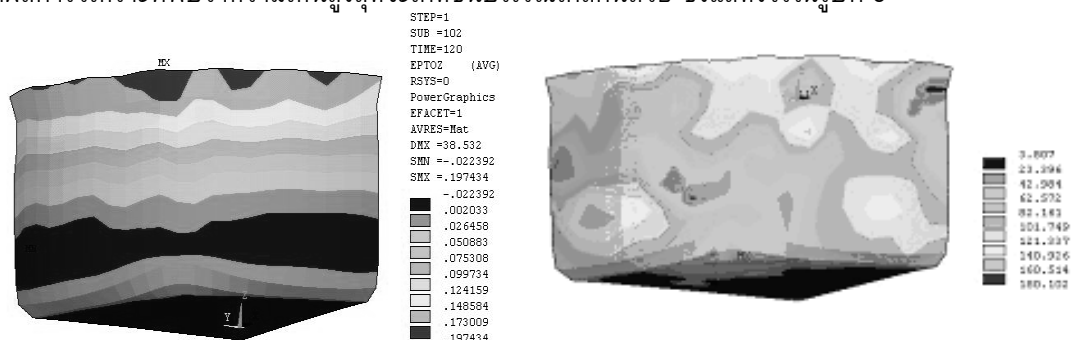
จากการวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้ค่าแรงกดยึดชิ้นงานที่ 17.5kN ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 และ 11.8 kN สำหรับอัตราส่วนการขึ้นรูป 1.33 และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.15 ได้ผลการศึกษาออกมาเป็นดังนี้



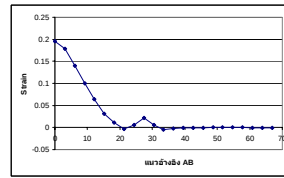
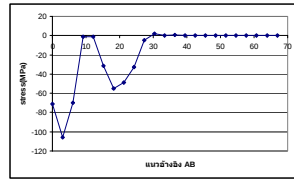
รูปที่ 5 เส้นแนวที่ทำการศึกษาการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดและแกนอ้างอิง

ความเค้นและความเครียด

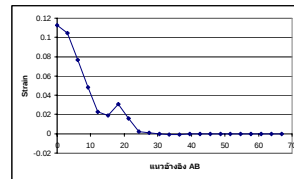
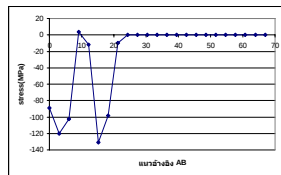
จากผลการวิเคราะห์พบว่าความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณใกล้กันถ้วย ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกระจายตัวของความเค้นในขั้นตอนที่ยังไม่ได้เอาภาระออก และเมื่อเอาภาระออก



รูปที่ 7 การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในแนว AB ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 รัศมีด้านบนของแม่แบบ 3 มม.

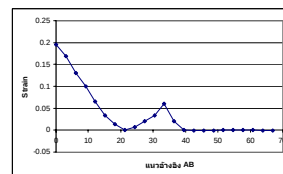
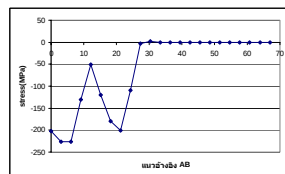


รูปที่ 8 การกระจายตัวความเค้นและความเครียดในแนว AB ที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.33 รัศมีด้านบนของแม่แบบ 3 มม.

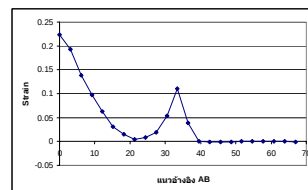
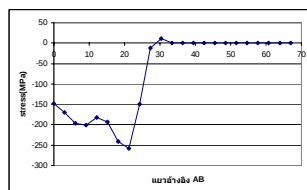
จากรูปที่ 7 พบว่าที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน มีทิศทางเดียวกันซึ่งจะทำให้ความเค้นตักค้างเกิดขึ้นได้น้อย และ การกระจายตัวของความเครียดค่อนข้างที่สม่ำเสมอ

ส่วนในรูปที่ 8 พบว่าที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.33 การกระจายของความเค้นในชิ้นงาน มีทิศทางที่สลับกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นตักค้างได้สูง ส่วนการกระจายตัวของความเครียดไม่สม่ำเสมอ

และจากรูปที่ 7 และ 8 เมื่อเปลี่ยนรัศมีด้านบนของแม่แบบด้านบนเป็น 3.5 และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยใช้อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูป 17.5 kN โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย 0.15 ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้



รูปที่ 9 การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในแนว AB ที่รัศมีด้านบนของแม่แบบ 3.5 มม.



รูปที่ 10 การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในแนว AB ที่รัศมีด้านบนของแม่แบบ 4 มม.

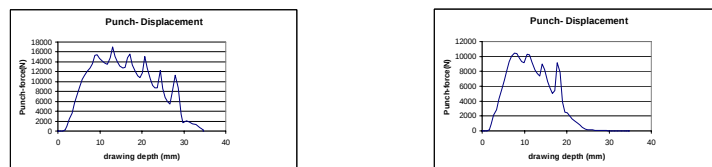
จากรูปที่ 9 พบว่าที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน มีทิศทางเดียวกันซึ่งจะทำให้ความเค้นตักค้างเกิดขึ้นได้น้อย และ การกระจายตัวของความเครียดไม่สม่ำเสมอ ส่วนในรูปที่ 10 การกระจายของความเค้นมีทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นตักค้างลดลง ส่วนการกระจายตัวของความเครียดไม่สม่ำเสมอ

แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป

สำหรับแรงที่ใช้ดึงสูงสุดได้จากสมการ[8]

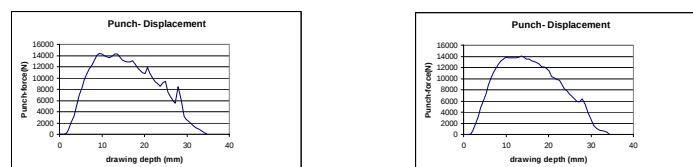
$$F_{d,max} = \pi \times d_m \times s_0 \left[1.1 \frac{1.3s_u}{\eta_{def}} \left(\ln \left[\frac{d_o}{d_1} \right] - 0.25 \right) \right] \quad (11)$$

โดยที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 ใช้แรงในการขึ้นรูป 17007.70 N และ ที่ อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.33 ใช้แรงในการขึ้นรูป 10431.00 N ที่รัศมีแม่แบบด้านบนเท่ากับ 3 มิลลิเมตร จากสมการที่ (11) ค่าแรงสูงสุดคือ 13048 N ซึ่งสมการที่ (11) จะไม่นำเอาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ) เข้ามาคิดแต่ในความเป็นจริงในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึกจะเกิดการเสียหายขึ้นซึ่งในการจำลองในครั้งนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเท่ากับ 0.15 จึงทำให้แรงที่เกิดขึ้นจากการทดลองจึงมากกว่าแรงที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ (11)



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการกดลึกที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 และ 1.33

เมื่อเปลี่ยนรัศมีแม่แบบด้านบน จาก 3 มิลลิเมตร เป็น 3.5 และ 4 มิลลิเมตรแรงสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองคือ 17007.70 14304.52 และ 14052.00 N ตามลำดับ



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปกับระยะที่กดลึกค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียหาย 0.15 รัศมี 3.5 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 11 พบว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนการขึ้นรูป จาก 1.57 เป็น 1.33 จะใช้แรงลดลงดังรูป ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (11) แต่ในรูปที่ 12 ไม่ได้เปลี่ยนอัตราส่วนการขึ้นรูปให้ลดลงแต่เปลี่ยนรัศมีด้านบนของแม่เท่านั้น พบว่าแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปลดลงเช่นเดียวกัน

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ใช้แรงในการขึ้นรูปลดลงเมื่อลดขนาดของอัตราส่วนการขึ้นรูปลงและยังทำให้แรงในการขึ้นรูปก่อนข้างจะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะ

4.2 เมื่อเปลี่ยนรัศมีด้านบนของแม่แบบให้โตขึ้น จาก 3 เป็น 3.5 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับที่อัตราส่วนการขึ้นรูป 1.57 แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูปจะลดลง และ ความเค้นสูงสุดก็จะลดลงเช่นเดียวกัน และมีทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน มีทิศทางไปในทางเดียวกัน จึงทำให้ความเค้นตกค้างลดลงทำให้ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหายเมื่อ นำเอาชิ้นงานที่ได้จากการดึงขึ้นรูปลึกลงไปทำการดึงขึ้นรูปซ้ำอีกครั้ง

4.3 ในการออกแบบแม่แบบควรจะคำนึงถึงขนาดของรัศมีด้านบนของแม่แบบ เพราะจากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดรัศมีด้านบนจะทำให้ ใช้แรงในการขึ้นรูปลดลง และ ความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจะมีทิศทางเดียวกันทำให้ความเค้นตกค้างลดลง แต่การกระจายตัวของความเครียดจะไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้เกิดรอยย่นที่ชิ้นงานได้

4.4 สำหรับแนวทางในการปรับปรุงวิธีการวิจัยให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยทำการจัดเอเลเมนต์โดยอัตโนมัติ (Adaptive Meshing) สมบัติทางกลของวัสดุที่กำหนดให้กับโปรแกรมควรจะกำหนดให้เป็นแบบ Piecewise Linear Plasticity ซึ่งเป็นการนำเอาข้อมูลจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุนั้นๆ

กิตติกรรมประกาศ

แต่ความทรงจำและความรักที่มีต่อ นายอ้วนจ้าว แซ่ลิ้ม และนางมะลิ ขอมีกกลาง บิดาและมารดาผู้ล่วงลับ ของ นาย ชัยวัฒน์ ยิ่งสุวัฒนา รักและเคารพ ดร.ประภา ภักดิ์โพธิ์ ผู้รับใบอนุญาตและอุปนายกสภา มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ผู้ให้การสนับสนุนด้านการทำงาน ขอขอบพระคุณ รศ. สารวจ อินแบน ผู้ให้คำแนะนำ พร้อมทั้ง ขอกราบขอบพระคุณนายธงชัย และ นางสุปราณี เรียวเรืองแสง กุล และ หลานๆ ทั้ง 3 คน ที่ให้ความอุปถัมภ์เมื่อไม่มีพ่อและแม่ และเธอผู้จุดประกายให้ลุกขึ้นมาต่อสู้สุดท้ายเพื่อนๆ ช่วงท้อและประสาน ไทย-เยอรมัน ขอนแก่น รุ่นที่25(เข้าเรียน ปวช.ปี พ.ศ.2532)ทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและไม่เคยทอดทิ้งกัน

รายการสัญลักษณ์

K สัมประสิทธิ์ความต้านทานแรง

σ ความเค้น

$[D]$ เมตริกซ์ความเค้นความเครียด

n เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

ε ความเครียด

$[D^e]$ เมตริกซ์ความเค้นความเครียดช่วงยืดหยุ่น

$[D^p]$	เมตริกซ์ความเค้นความเครียดช่วงพลาสติก	$[M]$	เมตริกซ์มวลของโครงสร้าง
$[K]$	คือเอลิเมนต์เมตริกซ์ของความแข็งเกร็ง	$[C]$	เมตริกซ์หน่วงของโครงสร้าง
$\{\ddot{u}\}$	เวกเตอร์ความเร่งที่จุดต่อ	$\{\dot{u}\}$	เวกเตอร์ความเร็วที่จุดต่อความเร็ว
$\{u\}$	เวกเตอร์การเคลื่อนตัวที่จุดต่อ	$\{F^t\}$	เวกเตอร์ของภาระที่กระทำ
$F_{d,max}$	แรงสูงสุดที่ใช้ในการขึ้นรูป	π	3.1416
d_m	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยซึ่งอยู่ระหว่าง ความหนาของชิ้นงาน		
s_0	ความหนาของชิ้นงานก่อนทำการขึ้นรูป		
S_u	ความเค้นแรงดึงสูงสุด		
η_{def}	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปโลหะ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.7		
d_0	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นแบลงก์ก่อนทำการขึ้นรูป		
d_1	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วย		

เอกสารอ้างอิง

- A.G. Mamalis, D.E. Manolacos and A.K. Baldoukas. 1997. "Simulation of sheet metal forming using explicit finite-element techniques: effect of material and forming characteristics Part 1. Deep-drawing of cylindrical cups" **Journal of Materials Processing Technology**, [serial online]. Volume72: 48-60.
- Anwar kardil 2003. "An experimental study of hydroforming deep drawing" **Journal of Materials Processing Technology**, [serial online]. Volume134: 70-80.
- Certificate of Quality (UL030625610) Alloy **3104 H-19** Alcan Taihan Aluminum Limited. Ulsan Plant 23rd Floor, Yonsei Jaedan Severance Bldg, 84-11, 5-ga, Namdaemum-ro, Jung-gu, Seoul, 100-753, Korea; 30 June 2003
- Der-Form Chang and Jyhwen E. Wang. 1998. "Analysis Draw- Redraw Processes" **International Journal of Mechanical Sciences**, [serial online]. Volume40: 793-804.
- Hallquist, John O. **LS-DYNA3D Theoretical Manual** [cited 3 March 2004]. Available from: <http://oscinfo.osc.edu/software/docs/lsdyna/theory.pdf>
- Joel Courbon. 2003. "Damage evolution in compressive forming process: ironing of beverage cans" **ScriptaMaterialia** [serial online]. Volume48: 1519-1524. Available from: www.sciencedirect.com
- Lange, K. 1985. **Handbook of Metal forming** Mac Graw-Hill Book company; 20.01-20.69.
- M.A. Hassan, N. Takakura, and K. Yamaguchi. 2003. "Friction aided deep drawing using newly developed blank-holder divided into eight segments" **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, [serial online]. Volume43: 637-646.
- S.H. Evangelista, J. Lirani and H.A. Al-Qureshi. 2002. "Implementing a modified Marcinaik – Kuczynski model using the finite element method for simulation of sheet metal deep drawing" **Journal of Materials Processing Technology**, [serial online]. Volume130-131: 135-144.
- S. Thiruvarduchelvan and N.H. Loh. 1994. Deep drawing of cylindrical cups with Friction-actuated blank holding" **Journal of Materials Processing Technology**, [serial online]. Volume40: 343-358.
- เจษฎา ชัยโณม ชานัน และ ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์. 2546. "การวิเคราะห์การสปันนิงด้วย
อะลูมิเนียมทรงกรวยด้วยวิธีไฟต์เอลิเมนต์" การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง

ประเทศไทยครั้งที่17 15-17 ตุลาคม จังหวัดปราจีนบุรี

ชัยวัฒน์ ยิ่งสุขวัฒนา, สํารวจ อินแบน, สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์. การวิเคราะห์ความคืบหน้าและความเครียดของภาชนะบรรจุเครื่องดื่มในขั้นตอนที่1โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.การประชุม

วิชาการเทคโนโลยีการการ ขึ้นรูปโลหะ ครั้งที่1. กรุงเทพฯ: 8 มกราคม 2547

ธเนศ เมฆฉาย สมพงษ์ ชีระคานนท์ และ ชานนท์ สุขตาอยู่ . 2539. **ทฤษฎีการดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing)**สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ปราโมทย์ เตชะอำไพ. 2542. **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สังคม ศรีสมพร. 2545. **การศึกษาสมบัติทางกลของการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อดิสร ประสิทธิ์ศักดิ์ และ อนุชา พรหมวังชา “การทำนายการเสียหายแบบอ่อนหนืดในการขึ้นรูปลึกแผ่นอลูมิเนียมรูปถ้วยทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส” **การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่17 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี**