

อิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ที่มีผลต่อการดีดตัวกลับในการดัดงอรูป

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง

The Influences of Die Clearance on Spring-back of High Strength Steel in U-bending Process

ภาสพิรุฬห์ ศรีสำโรง¹ คมกริช ละวรรณวงษ์¹ วารุณี เปรมานนท์¹ พงศ์พันธ์ แก้วตาทิพย์² และ อนรรฆ ชันชะชนะ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ ²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาอุทิศ (สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร. 0-2470-9209, โทรสาร 0-2872-9080 E-mail : varunee.pre@kmutt.ac.th

Bhadpiroon SRESOMREONG¹, Komgrit LAWANWONG¹, Varunee PREMANOND¹, Pongpan KAEWTATIP²
and Anak KHANTACHAWANA²

¹Department of Tool and Materials Engineering, ²Department of Mechanical Engineering,

Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,

91 Pracha-u-tit Rd.Bangmod Tungkru Bangkok 10140 Thailand

Tel: 0-2470-9209, Fax: 0-2470-9210 E-mail : varunee.pre@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงกำลังเป็นที่นิยมใช้สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศ และมีแนวโน้มที่จะใช้เกรดที่มีค่าความแข็งแรงสูงสูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทก และลดน้ำหนักของชิ้นส่วนยานยนต์ ทำให้อัตราบริโภคน้ำมันของรถยนต์ลดลง ในขณะที่ความสามารถของการรับแรงยังคงอยู่ ค่าต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานหลังการขึ้นรูปมีรูปร่างไม่เป็นไปตามที่ต้องการ โดยเฉพาะปัญหาการดีดกลับของชิ้นงานหลังการดัดงอ ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ที่มีผลต่อการดีดตัวกลับในการดัดงอรูปแบบมีปีกกับชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงความหนา 2 มิลลิเมตรสองเกรดคือ JIS 440 และ JIS 590 ซึ่งเป็นเกรดที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในขณะนี้ โดยกำหนดค่าเคลียร์แรนซ์ 3 ระยะคือ 2 1.9 และ 1.8 มิลลิเมตรตามลำดับ การทดลองทำการเก็บผลการดีดตัวกลับของชิ้นงาน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางในการดัดงอ และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (DEFORM-2D) ผลการวิจัยพบว่าแรงที่ใช้ในการดัดงอจะเพิ่มขึ้นในวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงสูงกว่า และค่าเคลียร์แรนซ์น้อย วัสดุที่มีความแข็งแรงสูงจะเกิดการดีดตัวกลับมากกว่า ในกรณีที่ใช้ค่าเคลียร์แรนซ์มีขนาดน้อยกว่าความหนาของชิ้นงานสามารถลดการเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดงอได้

คำสำคัญ : เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง การดัดงอรูป การดีดตัวกลับ
ระยะเคลียร์แรนซ์

Abstract

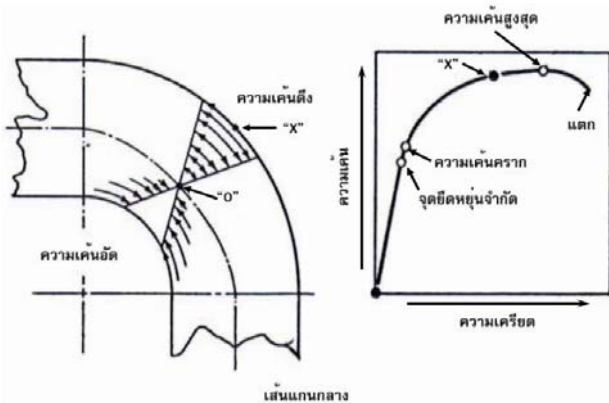
High Strength Steel (HSS) has been widely use in automotive industry in Thailand and its trend usage in higher strength to reduce weight of auto-parts then reducing for fuel consumption while improves crash worthiness. Increasing the strength to a higher degree effects to a shape of workpiece changed after forming, especially spring-back problem. This research studied on the influence of die clearance on spring-back of high strength steel in U-bending process (hat shape). High strength steel grade JIS 440 and JIS 590, 2 millimeters of thickness are used, which they have been widely use now. Three clearance values are defined in this research; 2, 1.9 and 1.8 millimeters. The experiment investigates spring-back of workpiece, force and stroke in bending process then analytical and compare with finite element method by DEFORM-2D software. The result has shown the bending force will be increase

in higher tensile strength material and lower clearance value. The higher tensile strength material occurs more spring-back. In case of clearance values less than workpiece thickness can decrease spring-back.

Keywords : High Strength Steel (HSS), U-bending, Spring-back, Die Clearance

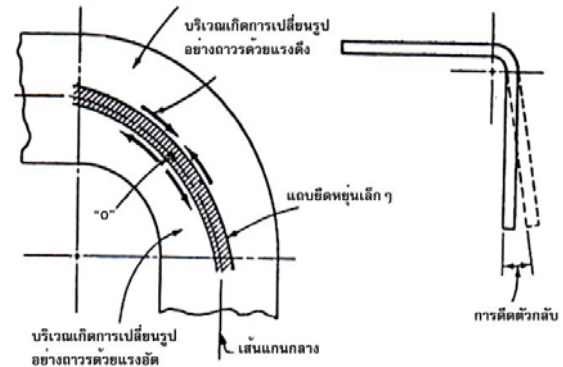
1. บทนำ

การดัดงอ (Bending) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ใช้กันแพร่หลายโดยเฉพาะในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ปัญหาที่พบในการดัดงอคือรูปร่างหลังการดัดงอไม่เป็นไปตามที่ต้องการอันเนื่องมาจากการดีดกลับ (Spring-back) ของชิ้นงาน เมื่อทำการดัดชิ้นงาน จะมีความเค้นเกิดขึ้นบริเวณที่ทำการดัด และความเค้นที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน ความเค้นสูงจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่ผิวด้านนอกของการดัด และจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะของชิ้นงานเข้าใกล้เส้นศูนย์กลางของความหนา ในขณะที่ผิวด้านในของการดัดจะเกิดความเค้นอัด



รูปที่ 1 การแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึง และความเค้นอัด ในบริเวณที่มีการดัด [1]

รูปที่ 1 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นดึง และความเค้นอัดในบริเวณที่มีการดัด จะเห็นได้ว่าที่จุด "0" นั้นความเค้นดึงมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจุดนี้จะอยู่บนเส้นแกนกลางของวัสดุ (Neutral Axis) บริเวณส่วนที่ใกล้กับเส้นแกนกลาง จะมีความเค้นเกิดขึ้นต่ำกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัด (Elastic Limit) โลหะที่อยู่ห่างออกไปจากเส้นแกนกลางของชิ้นงานจะมีความเค้นเกิดขึ้นมากกว่าจุดความแข็งแรงครากตัว (Yield Point) ของชิ้นงาน ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) เมื่อทำการดัดงอชิ้นงานแล้ว ขณะดึงพื้นผิวออกส่วนที่อยู่ใกล้กับเส้นแกนกลางจะพยายามดึงตัวกลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิม แต่ไม่สามารถดึงตัวกลับคืนได้หมด เพราะมีความต้านทานในส่วนที่มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร ดังนั้นจึงเกิดการดีดกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2 [1]



รูปที่ 2 การเกิดการดีดตัวกลับของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป [1]

เหล็กกล้าความแข็งแรงสูงกำลังเป็นที่นิยมสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทก โดยไม่เพิ่มน้ำหนักของตัวรถ แต่ปัญหาสำคัญของเหล็กดังกล่าวคือรูปร่างที่ไม่เป็นไปตามต้องการหลังการขึ้นรูป โดยเฉพาะการเกิดการดีดกลับของชิ้นงานหลังการดัด ทำให้ยากต่อการประกอบกับชิ้นส่วนอื่น การชดเชยของการดัดชิ้นงาน เป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว แต่ผู้ออกแบบแม่พิมพ์ก็ต้องทำการทดลอง และปรับแก้ให้ได้มุมดัดที่ต้องการ ขนาดของช่องว่างระหว่างฟันชักกับตาย หรือเคลียแรนซ์ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งต่อการดีดกลับของชิ้นงาน แต่ไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึงผลของการลดค่าเคลียแรนซ์ในการดัดงอให้น้อยกว่าความหนาของชิ้นงาน มีเพียงทฤษฎีแนะนำให้เคลียแรนซ์เป็น 1.05 ถึง 1.15 ของความหนาชิ้นงาน ในกรณีที่วัสดุเป็นเหล็ก [2] ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาถึงอิทธิพลของเคลียแรนซ์ในกระบวนการดัดงอรูปอยู่กับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่มีผลต่อรูปร่างของชิ้นงานหลังการดัดงอ

2. วิธีการ และเงื่อนไขของการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ และเงื่อนไขในการทดลอง

ชุดแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดแม่พิมพ์ดัดงอรูปยูที่ใช้ในการทดลอง

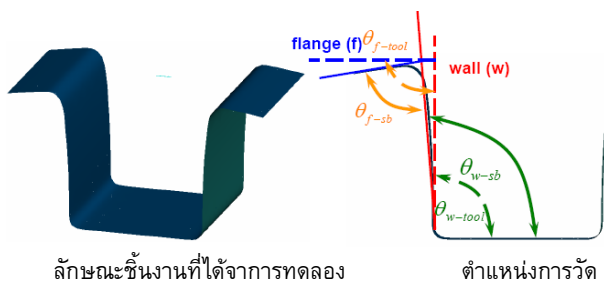
โดยการทดลองจะทำการเปลี่ยนระยะห่างของเคลียแรนซ์ที่ต้องการศึกษาคือ 2 1.9 และ 1.8 มิลลิเมตร หรือ เท่ากับความหนาชิ้นงาน น้อย

กว่าความหนาชิ้นงานร้อยละห้า และ น้อยกว่าความหนาชิ้นงานร้อยละสิบตามลำดับ รัศมีพันซ์ และรัศมีตายเท่ากับ 2 และ 5 มิลลิเมตร แรงที่ใช้ในการดัดชิ้นงานได้จากสปริงแม่พิมพ์ (coil spring) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.16 กิโลนิวตันที่ระยะดัดลึก 52 มิลลิเมตร ทำการดัดชิ้นงานเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JIS 440 และ JIS 590 ความหนา 2 มิลลิเมตร แผ่นชิ้นงานเริ่มต้นขนาด 176x50 มิลลิเมตร

เครื่องเพรสที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องเพรสไฮดรอลิกแบบ จังหวะเดียวคุณภาพปานกลาง ขนาด 150 ตัน ใช้แรงจาก Coil Spring สำหรับการกดแผ่นจับยึดชิ้นงาน แรง และระยะทางที่ใช้ในการขึ้นรูปใช้ โวลต์เซลล์ และอุปกรณ์วัดระยะทาง (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) ต่อเข้ากับอุปกรณ์ประมวลผลแรง และระยะทาง ผลลักษณะของรูปร่างชิ้นงานที่เกิดขึ้น ทำการวัดค่าองศาการดัดกลับโดยใช้เครื่องโปรไฟล์โปรเจคเตอร์ (Profile Projector)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการทำการจำลองการทำงาน

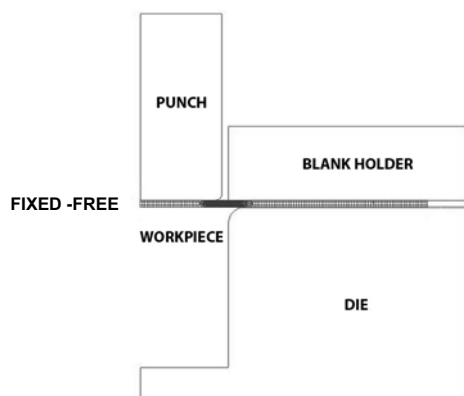
Analysis Type	Plane Strain
Workpiece Material and Mechanical Properties	(1) HSS; JIS 440 $t = 2.00$ mm, Yield Stress (σ_y) = 339 N/mm ² , Elastic Modulus = 150 GPa Poisson's Ratio (ν) = 0.17 Flow curve, $\bar{\sigma} = 815 \bar{\epsilon}^{0.14}$ (2) HSS; JIS 590 $t = 2.00$ mm, Yield Stress (σ_y) = 487 N/mm ² , Elastic Modulus = 203 GPa Poisson's Ratio (ν) = 0.3 Flow curve, $\bar{\sigma} = 969.2 \bar{\epsilon}^{0.15}$
Tool	Clearance = t , -5% t and -10% t or 2, 1.9 and 1.8 mm.(one side)
Friction Coefficient	0.10



รูปที่ 4 ตำแหน่งการวัดองศาการดัดตัวกลับของชิ้นงาน

2.2 วิธีการ และเงื่อนไขในการจำลองการทำงาน

ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทำการจำลองการทำงานคือ DEFORM-2D เวอร์ชัน 7.2 รูปแบบการตั้งอที่จะทำการวิเคราะห์เป็นแบบความเครียดระนาบ (Plane Strain) โมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Analysis Model) แสดงให้เห็นในรูปที่ 5 และเงื่อนไขของการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นในตารางที่ 1 ซึ่งชิ้นงานจะถูกกำหนดเป็น Elasto-Plastic Body ในขณะที่พันซ์ ดาย และแผ่นจับยึดชิ้นงาน ถูกกำหนดให้เป็น Rigid Body

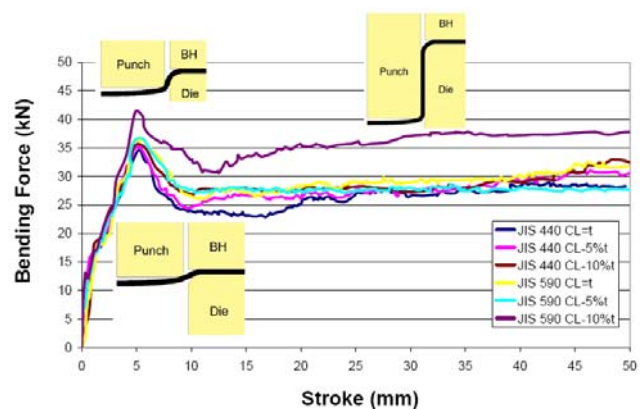


รูปที่ 5 วิธีการยึดชิ้นงาน

3. ผล และการวิเคราะห์ผล

3.1 ความสัมพันธ์ของแรงกับระยะทางในการขึ้นรูป

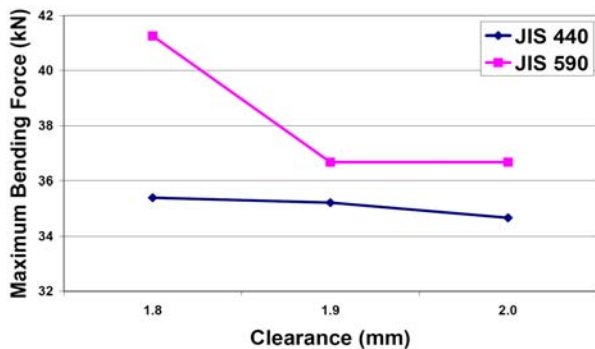
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะทางในการขึ้นรูป ที่ช่วงแรกในกราฟเมื่อกดพันซ์ลงบนชิ้นงานแรงเพิ่มขึ้นสูง ซึ่งในช่วงนี้เป็นการเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวรของทั้งตัวชิ้นงานเอง และชุดแม่พิมพ์ หลังจากกดพันซ์ต่อเนื่อง แรงจะเพิ่มขึ้นช้าลงจนถึงตำแหน่งสูงสุด ซึ่งเป็นบริเวณที่ชิ้นงานถูกดัดงอเสร็จสิ้นสมบูรณ์และแรงจะลดต่ำลง เมื่อพันซ์ยังคงลากชิ้นงานผ่านดายโดยมีแผ่นกั้นชิ้นงานกระทำอยู่ จึงทำให้แรงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามระยะทางที่พันซ์เคลื่อนที่ เนื่องจากไม่มีการแตกของชิ้นงานจึงไม่มีส่วนที่แรงลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกับระยะทางในการขึ้นรูป

นำค่าแรงสูงสุดในการดัดชิ้นงานของแม่พิมพ์ (ช่วงที่ชิ้นงานถูกดัดงอเสร็จสมบูรณ์) ที่มีระยะเคลียแรนซ์ต่างกันมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 7 จะเห็นว่าเมื่อใช้แม่พิมพ์ที่มีระยะเคลียแรนซ์ น้อยกว่าความหนาของชิ้นงานจะใช้แรงในการดัดสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ชิ้นงานจะถูกพันซ์ลากผ่านดายในลักษณะรีด ทำให้เกิดความเค้นแรงอัดจากพันซ์ และดายกระทำต่อชิ้นงานสูงขึ้น ส่วนแรงที่ใช้ในการดัด ชิ้นงานที่ระยะเคลียแรนซ์เท่ากับความหนาชิ้นงานนั้นจะเป็นแรงที่ใช้ใน

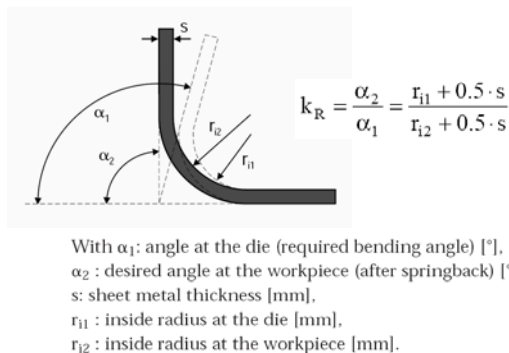
การเอาชนะค่าความเค้นครากของวัสดุที่บริเวณรัศมีของพันทซ์ซึ่งเป็นส่วนที่ชิ้นงานถูกดัดขึ้นรูป ทำให้ค่าของแรงดัดที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยกว่ากรณีระยะเคลียร์น้อยกว่าความหนาชิ้นงาน



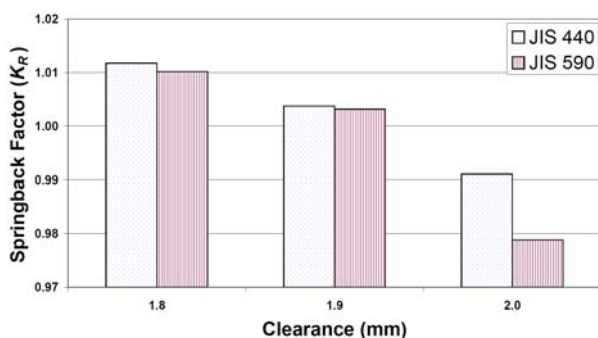
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับระยะห่างเคลียร์

3.2 อิทธิพลของเคลียร์แรนซ์ที่มีต่อการดัดตัวกลับของชิ้นงาน

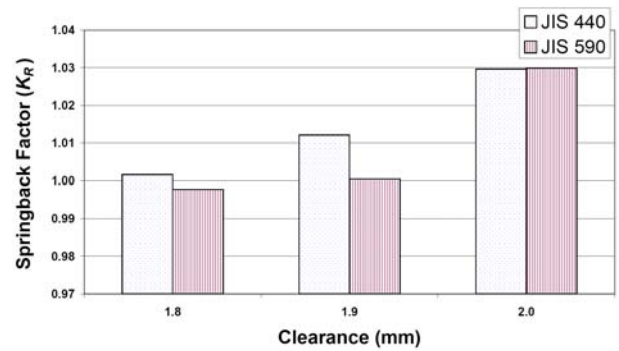
ผลการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลักกล้าความแข็งแรงสูงที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดต่างกัน และทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่ค่าเคลียร์แรนซ์ต่างกัน แสดงโดยค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับ (Spring-back Factor; K_R) ซึ่งหาได้จากสัดส่วนของมุมของชิ้นงานหลังการขึ้นรูปต่อมุมของพันทซ์ วิธีการหาแสดงในรูปที่ 8 และค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับของชิ้นงานทั้งสองวัสดุ และที่ระยะเคลียร์แรนซ์ต่างกันแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 8 การหาค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับของชิ้นงาน [3]



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับของชิ้นงานบริเวณผนัง (wall)

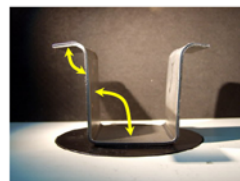


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับของชิ้นงานบริเวณปีก (flange)

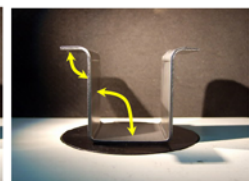
จากรูปที่ 9 ผลของสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับมีค่าลดลงเมื่อระยะเคลียร์แรนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นกรณีที่บริเวณผนังชิ้นงาน แต่ในรูปที่ 10 บริเวณปีกชิ้นงานค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเคลียร์แรนซ์เพิ่มขึ้น ในการพิจารณาคุณภาพรูปทรงของชิ้นงาน หากค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับมีค่าเท่ากับหนึ่ง “1” นั้นหมายความว่าชิ้นงานที่ผ่านการดัดงอมีมุมมองหลังจากการดัดเท่ากับองศาของพันทซ์ หากมีค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับน้อยกว่าหนึ่ง ชิ้นงานจะเกิดการดัดตัวกลับ แต่หากค่าดังกล่าวมากกว่าหนึ่ง แสดงว่าชิ้นงานที่ผ่านการดัดงอเกิดการหุบเข้า หรือที่เรียกว่า “Spring-go” เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเคลียร์แรนซ์ต่างๆ พบว่ากรณีเคลียร์แรนซ์มีค่าน้อยกว่าความหนาชิ้นงานสามารถลดการดัดตัวกลับของชิ้นงานได้ แต่ถ้าใช้ค่าเคลียร์แรนซ์น้อยกว่าความหนาชิ้นงานมากเกินไป จะทำให้ชิ้นงานถูกพันทซ์ลากผ่านตายในลักษณะถูกรีดส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหุบเข้า

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงของวัสดุ วัสดุเกรดที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวกลับน้อยกว่า ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานเกิดมุมดัดกลับมาก ภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการดัดงอรูปชิ้นงานที่มีระยะเคลียร์แรนซ์ และค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุต่างกันแสดงในรูปที่ 11

JIS 440

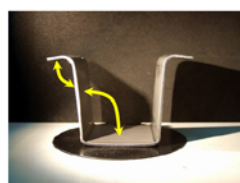


Clearance = t

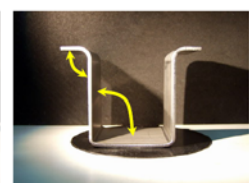


Clearance = -10%t

JIS 590



Clearance = t

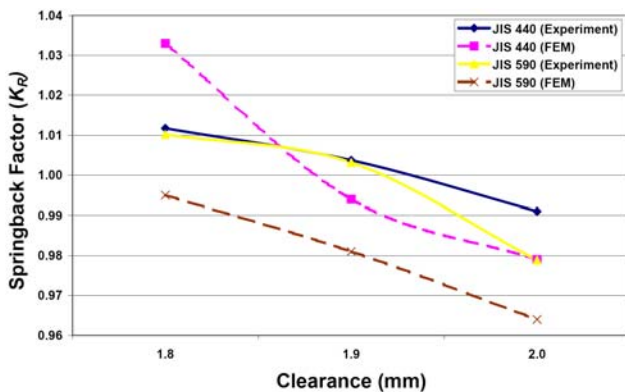


Clearance = -10%t

รูปที่ 11 ชิ้นงานหลักกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านกระบวนการดัดงอรูป

3.3 ผลและการวิเคราะห์ด้วยการจำลองการทำงาน

เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการทดลอง และให้ทราบถึงสภาวะความเค้นที่เกิดบริเวณชิ้นงานที่ถูกการดัดขึ้นรูป คณะผู้วิจัยได้ทำการจำลองการดัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ DEFORM-2D แล้วทำการวัดค่าองศาการดัดตัวกลับของชิ้นงานที่ได้จากการจำลองเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองที่ระยะต่างๆของเคลียร์แรนซ์ ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นในรูปที่ 12 จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าจากการทำการจำลองการทำงาน องศาการดัดตัวกลับเกิดมากสุดกับค่าเคลียร์แรนซ์เท่ากับความหนาชิ้นงาน และกับเหล็กที่มีค่าต้านทานแรงดึงที่มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากการทดลองและลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การดัดกลับของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง และจำลองการทำงาน

4. บทสรุป

- 1.เคลียร์แรนซ์มีอิทธิพลต่อคุณภาพของรูปทรงชิ้นงาน การชดเชยเคลียร์แรนซ์อาจช่วยลดการดัดตัวกลับของชิ้นงานได้ แต่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปสูงกว่า ดังนั้นการสึกหรอของแม่พิมพ์ย่อมมากตามด้วย
- 2.เหล็กที่มีค่าความแข็งแรงสูง จะเกิดการดัดตัวกลับของชิ้นงานมากกว่าเหล็กที่มีค่าต้านทานแรงดึงต่ำกว่า
- 3.เคลียร์แรนซ์น้อยสามารถลดการดัดตัวกลับของชิ้นงานหลังการดัดงอรูปได้ ถ้ามีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดหุบเข้า
- 4.จากการทดลอง ระยะเคลียร์แรนซ์ที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการดัดตัวกลับ หรือหุบเข้าสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JIS 440 ควรอยู่ที่ค่า 1.94 มิลลิเมตร และสำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด JIS 590 ควรอยู่ที่ 1.92 มิลลิเมตร

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Donald F. Eary, and Edward A. Reed., 1974. Techniques of Pressworking Sheet Metal 2nd edition, New Jersey, Prentice-Hall, pp.60-62.
- [2] Ivana Suchy., 1997. Handbook of Die Design. New York, McGraw-Hill, pp.8-8.
- [3] Shuler., 1998. Metal Forming Handbook. New York, Springer, pp.366-367.

- [4] You-Min Huang, and Daw-Kwei Leu., 1995. An elasto-plastic finite element analysis of sheet metal U-bending process. Journal of Materials Processing Technology 48, Elsevier, pp.151-157.
- [5] J.R. Cho, S.J. Moon, Y.H. Moon, and S.S. Kang., 2003. Finite element investigation on spring-back characteristics in sheet metal U-bending process. Journal of Materials Processing Technology 141, Elsevier, pp.109-116
- [6] M. Samuel., 2000. Experimental and numerical prediction of springback and side wall curl in U-bendings of anisotropic sheet metals Journal of Materials Processing Technology 105, Elsevier, pp.382-393.
- [7] Manabu TAKAHASHI., 2003. Development of High Strength Steels for Automobiles. <http://www0.nsc.co.jp/shinnihon/english/kenkyusho/contenthtml/n88/n8802.pdf> (accessed on January 2006).