1. บทนำ

Hosford, W.F. และ Caddell, R.M. (1983) ได้แบ่งกระบวนการขึ้นรูปโลหะออกเป็นสองกระบวนการหลักด้วยกันคือ กระบวนการขึ้นรูปก้อนโลหะ (Bulk-Forming Processes) และ กระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet-metal Forming Processes)

ความแตกต่างระหว่างสองกระบวนการมีอยู่หลายประการ เช่น ในการขึ้นรูปก้อนโลหะนั้น ความเค้นกดจะเป็นตัวเด่น และมักจะมีการรองรับด้วยเครื่องมือในขณะแปรรูป ในขณะที่ การขึ้นรูปโลหะแผ่นความเค้นดึงจะเป็นตัวเด่น และมักจะปล่อยให้ผิวหน้าที่มีการแปรรูป มีอิสระในหนึ่งหรือสองด้าน

ในกระบวนการขึ้นรูปทั้งสองแบบ ความสามารถในการขึ้นรูป ขึ้นอยู่กับการหล่อลื่น และเครื่องมือมากพอๆกับคุณสมบัติของวัสดุ ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างทั้งสองกระบวนการ คือ การเกิดความเสียหายในการขึ้นรูป ในกระบวนการขึ้นรูปก้อนโลหะ ความเสียหายเกิดจากการแตกหักได้ แต่ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยทั่วไปเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพในการดึงในช่วงพลาสติก มากกว่าเกิดจากการแตกหักอย่างมาก

แม้ว่าทั้งกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นและกระบวนการขึ้นรูปก้อนโลหะจะมีพื้นฐานเดียวกัน แต่เป็นการยากอย่างมากที่จะอธิบายกระบวนการขึ้นรูปทั้งสองกระบวนการในรูปแบบทั่วๆไปได้ แม้แต่ในกระบวนการการขึ้นรูปโลหะทั้งสองกระบวนการนี้ยังต้องมีการแบ่งแยกการพิจารณาออกเป็นกระบวนการย่อยอีกหลายกระบวนการ เกณฑ์ที่ใช้แบ่งกระบวนการต่างๆออกจากกัน ส่วนมากเกิดจากความต้องการที่จะพิจารณากระบวนการขึ้นรูปให้จำกัดอยู่ในรูปแบบที่สนใจเท่านั้น ทำให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและการคำนวน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นเท่านั้น

ประวัติความเป็นมาและแนวทางในอนาคตของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น

ในอดีตที่ผ่านมา ขั้นตอนการพัฒนาการปั้มโลหะแผ่น เริ่มจากความคิดริเริ่ม แล้วถ่ายทอดออกมาเป็นการออกแบบชิ้นส่วน จากนั้นจึงออกแบบแม่พิมพ์ และในที่สุดเป็นการทดสอบใช้แม่พิมพ์ ขั้นตอนการพัฒนานี้ดำเนินไปอย่างช้าๆ เนื่องจากกระบวนการที่ต้องระมัดระวังนั้น ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของการลองผิดลองถูกและทักษะของช่างฝีมือ ปัจจุบันโรงงานปั้มโลหะแผ่นได้ประสบความสำเร็จเฉพาะการพัฒนาเทคโนโลยีของทักษะฝีมือ ที่พัฒนาขึ้นโดยช่างฝีมือตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ในปัจจุบันนี้ยังเป็นการยากลำบากที่จะใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์เพียงอย่างเดียวเพื่อมาใช้ในการพัฒนาการปั้มโลหะแผ่น แม้แต่การลอกเลียนความสามารถของช่างฝีมือในการผลิตชิ้นส่วนยังกระทำได้ไม่ง่ายนัก ในขณะที่การพัฒนาในส่วนที่เกี่ยวข้องอื่นๆที่มีความยุ่งยากพอๆกัน ดังนั้นในการพัฒนาการปั้มโลหะแผ่นโดยใช้การวิเคราะห์ จึงสามารถได้คำตอบแบบวิเคราะห์เพียงแค่โดยประมาณเท่านั้น และสามารถนำมาใช้คาดหมายกระบวนการการผลิตชิ้นส่วนแบบง่ายๆเฉพาะอย่างของการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่เคยทำมาเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม การที่จะปฏิวัติระบบขั้นตอนการพัฒนาการปั้มโลหะแผ่นของช่างฝีมือก็กำลังเกิดขึ้นด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

1. เพื่อยุติระบบการฝึกหัดฝีมือที่ใช้เวลานาน
2. มีแนวโน้มว่าการเกษียนอายุของช่างฝีมือจะเร็วขึ้น
3. เพื่อลดเวลาการเตรียมการ ตั้งแต่การพัฒนาแม่พิมพ์จนถึงการทดสอบแม่พิมพ์
4. มีความยุ่งยากสลับซับซ้อนของชิ้นส่วนเพิ่มมากขึ้น
5. มีการนำวัสดุใหม่ที่ไม่คุ้นเคย เพื่อนำมาใช้ทดแทนวัสดุเดิมที่เคยทำกันมา
6. มีผลกระทบสืบเนื่องมาจากประสิทธิภาพของต้นทุนอย่างมาก
7. มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมากในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

โดยทั่วไปเป็นการยากอย่างมากสำหรับคนทำแม่พิมพ์ ที่จะสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม โดยปราศจากความช่วยเหลือของวิศวกรในกระบวนการผลิต การพัฒนากำลังเกิดขึ้นในอัตราที่สูงมากอย่างไม่เคยเป็นมาก่อน คนทำแม่พิมพ์ทั่วๆไปไม่มีความสามารถที่เพียงพอที่จะรับมือกับการพัฒนาเหล่านี้ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างมากที่จะแทนที่การทดลองเป็นหลักและใช้เทคนิคการลองผิดลองถูก ด้วยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้พื้นฐานความรู้และต้นทุนที่มีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปโลหะแผ่นมาทดแทน ผลผลิตในการขึ้นรูปโลหะแผ่นสามารถเพิ่มขึ้นได้ ถ้ารูปทรงของชิ้นส่วน การประกอบชิ้นส่วน การออกแบบแม่พิมพ์ และตัวพารามิเตอร์ของคุณสมบัติของวัสดุ ได้กำหนดไว้อย่างถูกต้องตั้งแต่ขั้นตอนในการออกแบบ

Keeler (1977) กล่าวถึงระบบที่จะใช้ในอนาคต หรือระบบที่จะมาทดแทนความสามารถของช่างฝีมือได้นั้น ควรจะต้องถึงพร้อมด้วยเงื่อนไข 8 ประการ คือ

1. จะต้องเป็นระบบที่ติดต่อกันได้ตลอดเวลา
2. จะต้องเป็นแบบจำลองที่มีทั้งตัวแปรที่รู้ค่าและตัวแปรที่ไม่รู้ค่า
3. จะต้องรวมคุณสมบัติต่างๆของวัสดุจริงไว้
4. จะต้องไม่ขึ้นกับกฎสำเร็จในอดีต
5. จะต้องมีความสามารถในการคาดการณ์ได้
6. จะต้องพัฒนาการติดต่อระหว่างกันของหน้าที่การออกแบบและหน้าที่การผลิต
7. จะต้องตอบรับความต้องการในการใช้งานใหม่ๆ
8. จะต้องเหมาะสมกับคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์ของผลผลิตสุดท้าย

เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดข้างต้น ระบบการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (Computer-Aided Design หรือ CAD) และระบบการผลิตโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (Computer-Aided Manufacturing หรือ CAM) ได้ถูกพัฒนาขึ้นและได้ถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ในการพัฒนาโปรแกรมระบบ CAD/CAM สำหรับการดำเนินการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาแบบจำลองดังต่อไปนี้

แบบจำลองการวิเคราะห์ที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆเช่น อุณหภูมิ ความเครียด และอัตราความเครียดเป็นต้น แบบจำลองการวิเคราะห์สำหรับพฤติกรรมของวัสดุควรจะสามารถคำนวณค่าขีดจำกัดในการแปรรูปของวัสดุได้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจำลองกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นเฉพาะเจาะจงลงไปในแต่ละกระบวนการที่สนใจ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการควรจะอธิบายสภาวะเฉพาะที่ของความเค้นและความเครียดในวัสดุระหว่างการแปรรูปได้

แบบจำลองทั้งสองแบบเมื่อนำมารวมกันจะเป็นพื้นฐานของระบบ CAD/CAM สำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งในแต่ละระบบต้องมีความสามารถในเรื่องของพฤติกรรมของวัสดุ เงื่อนไขของกระบวนการ ตัวแปรของกระบวนการ และเครื่องมือของกระบวนการ โดยสามารถพิจารณาข้อมูลพร้อมๆกันทั้งหมด

แบบจำลองการวิเคราะห์พฤติกรรมวัสดุ

การพัฒนาแบบจำลองวัสดุจะเป็นขั้นตอนหนึ่งในการพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อต่อไปนี้

1. การได้มาและการวัดค่าของคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องเช่นพฤติกรรมของวัสดุเป็นต้น
2. การวินิจฉัยและการพิสูจน์สมการองค์ประกอบ (Constitutive Equations) ที่สามารถนำมาใช้ได้กับวัสดุและกระบวนการ

พฤติกรรมของโลหะแผ่น

ในความพยายามที่จะใช้คุณสมบัติของวัสดุในกระบวนการขึ้นรูป มีความยากลำบากในเรื่องของการกำหนดความเครียดในอดีตทั้งหมดของวัสดุ ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรสองประเภทคือ

1. ขีดจำกัดของการไหลอย่างมีเสถียรภาพ (Stable Flow) ซึ่งวัสดุสามารถคงไว้ได้
2. จุดที่เกิดการแตกหักของวัสดุ

จากลักษณะเช่นนี้หมายความว่า ตัวพารามิเตอร์ที่พิสูจน์จากขีดจำกัดความเครียดที่มีความเครียดอยู่แล้วของการทดสอบแรงดึงแกนเดียวจึงเป็นค่าที่ไม่แน่นอน และสามารถอธิบายได้ว่าทำไมการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับความเครียดแบบพลาสติกในช่วงกว้างๆเช่น Bulge Test ของโลหะแผ่นกำลังถูกนำมาใช้ในปัจจุบัน แม้ว่าผลกระทบจากความฝืดและอัตราการไหล (Friction and Flow Rate) จะไม่ได้นำมาคิดด้วย แต่การขึ้นรูปโลหะแผ่นยังมีความซับซ้อน เพราะความมีเสถียรภาพและกระบวนการแตกหักยังต้องพิจารณาจากทั้งทางด้านสภาวะความเครียดและรายละเอียดทางจุลโครงสร้าง

เพื่อที่จะอธิบายพฤติกรรมของวัสดุในจุดที่สนใจ ข้อมูลที่ต้องการซึ่งอาจหามาจากค้นคว้าหรือจากการทดลองหรือจากทั้งสองอย่างคือ ข้อมูลการทดสอบแรงดึงแกนเดียวเช่นการทดสอบแรงดึงด้วยอัตราการยืดคงที่ , ข้อมูลความเค้นกับอัตราความเครียดที่ความเครียดและอุณหภูมิที่ต้องการเช่น Load Relaxation Test , ข้อมูล Hydraulic Bulge Test , ข้อมูล Plastic Anisotropy และข้อมูลอื่นๆ

จากข้อมูลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมของโลหะแผ่นโดยการนำมารวบรวมและแสดงไว้ในแบบรูปกราฟที่เรียกว่าแผนภาพขีดจำกัดการขึ้นรูป (Forming Limit Diagram , FLD)

<u>ขอบเขตของการวิจัย</u>

Gotoh, Misawa และ Lim (1993) ได้มีการหาค่าขีดจำกัดความเครียดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น หรือ Forming Limit Strain ด้วยเหตุผลที่ว่า ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบพลาสติก ปริมาณการแปรรูปของโลหะแผ่นที่ปราศจากความเสียหายเป็นสิ่งสำคัญมาก ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาวิจัยสิ่งที่เป็นตัวแปรในการหาค่า Forming Limit Strain จึงได้ถูกทำการศึกษาวิจัยทั้งทางด้านการทดลอง และ ทางด้านทฤษฎี

ในการศึกษาทางด้านทฤษฎีที่เกี่ยวกับค่า Forming Limit Strain ของโลหะแผ่น พบว่าโดยทั่วไปใช้พื้นฐานทางความคิดที่ว่า ความเสียหายเกิดขึ้นเนื่องจากรูปแบบคอคอดเฉพาะที่หรือ Localized Necking ดังนั้นเมื่อมีการใช้สมการ Flow Curve หรือสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นแบบ Conventional n-Th. Power Law Approximation ($\sigma = C\varepsilon^{n}$) ทุกทฤษฎีที่รวมกับทฤษฎี Anisotropy ต่างคาดคะเนว่าค่า Forming Limit Strain ของโลหะแผ่นใดๆ ที่อยู่ภายใต้ Biaxial Stress State จะเป็นไปตามค่า Strain-Hardening Exponent (n) ดังนี้คือ $[(\varepsilon_1)_{Cr.}]_{\rho = 0} = n$ โดยที่ $(\varepsilon_1)_{Cr.}$ คือค่า Forming Limit Strain หรือค่าความเครียดวิกฤตในแนวแกนหลัก ที่เงื่อนไข Constant Strain Ratio (ρ) เท่ากับศูนย์

ในการทดสอบแรงดึงของโลหะแผ่นโดยทั่วไปภายใต้ Uniaxial Stress State การเกิดคอคอดจะเกิดสองแบบติดต่อกันคือ เกิด Diffuse Necking ก่อนแล้วเกิด Localized Necking ตามมา การคำนวณทางด้านทฤษฎีโดยใช้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นแบบ Conventional n-Th. Power Law Approximation ($\sigma = C\varepsilon^{n}$) พบว่าค่า $(\varepsilon_1)_{Cr.}$ เท่ากับ n และ 2n ตามลำดับ

Ghosh (1977) ได้มีการทดสอบวัสดุเกรด A 5182-0 แสดงให้เห็นว่า ค่า Forming Limit Strain มีค่าต่ำกว่าค่า n โดยที่ไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจนใดๆ แต่ผู้วิจัยกลับยืนยันว่าผลที่ได้เกิดจากผลกระทบของค่า Strain-Rate Sensitivity Exponent (m) และในเอกสารก็มีการรายงานค่า m เท่ากับ -0.001

จากผลการทดลองเช่นเดียวกับของ Ghosh (1977) พบว่า มีวัสดุหลายชนิดที่มีค่า Forming Limit Strain แบบ Plane Strain Tension มีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่า n (มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า) ทำให้เกิดข้อสงสัยในความคิดพื้นฐานที่ทฤษฎีใช้อยู่ มีงานวิจัยหลายชิ้นยืนยันว่าปรากฏการณ์นี้ไม่เกี่ยวข้องกับอัตราความเครียดซึ่งได้รับอิทธิพลจาก Strain-Rate Sensitivity Exponent (m) เนื่องจากคำอธิบายสองประการ คือ ข้อแรกค่า m มักเป็นบวกเสมอ ดังนั้นจึงไม่อาจทำให้ค่า Forming Limit Strain ลดลงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิห้องค่า m จะมีค่าเข้าใกล้ ศูนย์อย่างมาก จึงมีบทบาทหรือผลกระทบต่อค่า Forming Limit Strain น้อย ส่วนคำอธิบายในข้อที่สองก็คือ ค่า n มีการเปลี่ยนแปลงตามความเครียด ทำให้ค่าที่ได้ตอนเกิด Localized Necking อาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากค่า Theoretical Limiting Strain

แต่อย่างไรก็ตาม คำอธิบายในข้อสอง ก็ยังไม่มีหลักฐานใดๆที่เชื่อถือได้นำมายืนยัน เป็นเพียงคำอธิบายเชิงปริมาณ เพื่อที่จะพิสูจน์คำอธิบายนี้ Gotoh และคนอื่นๆ (1993) จึงได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยใช้รูปแบบสมการพหุนามกำลังสี่ จากการทำ (Quasi-) Plane Strain Tension ผลปรากฏว่าค่า Theoretical Limiting Strain มีค่าใกล้เคียงกับ Experimental Limiting Strain เมื่อค่า n ที่ได้หาได้จากสมการพหุนามกำลังสี่ จึงยืนยันว่าในทางทฤษฎีนั้นมีความถูกต้อง แต่ที่เกิดการเบี่ยงเบนไปจากความจริง เนื่องจากว่า ความไม่แม่นยำของสมการแบบ Conventional n-Th. Power Law Approximation ในการหาค่า n จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสมการ ณ.จุดวิกฤตที่เกิด Localized Necking

สำหรับในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาขีดจำกัดความเครียดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยการเปรียบเทียบค่าขีดจำกัดความเครียดที่ได้จากการทดลองจริง กับขีดจำกัดความเครียดที่ได้จากแบบจำลองสองแบบ แบบจำลองแบบแรกมาจากทฤษฎีของ ฮิลล์ และแบบจำลองแบบที่สองมาจากค่า Strain-Hardening Exponent (n) ที่หาได้จากความสัมพันธ์แบบลอการิทึมของความเค้นกับความเครียด

แบบจำลองแบบแรกเป็นแบบจำลองที่คำนวณมาจากทฤษฎีของ ฮิลล์ ซึ่งรวมผลกระทบจากคุณสมบัติ Anisotropy ของวัสดุเข้ามาไว้ด้วย ดังนั้นค่าขีดจำกัดความเครียดที่ได้จากแบบจำลองนี้จึงสามารถแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติ Anisotropy ที่มีต่อขีดจำกัดความเครียดในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

แบบจำลองแบบที่สองเป็นแบบจำลองที่มาจากการกำหนดให้ค่าขีดจำกัดความเครียดมีค่าเท่ากับค่า Strain-Hardening Exponent (n) ซึ่งกำหนดให้เท่ากับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของความสัมพันธ์แบบลอการิทึมของความเค้นกับความเครียด

การเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองแบบเพื่อหาแบบจำลองที่ดีกว่า ทำได้โดยการใช้เครื่องมือทางสถิติเข้ามาทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งขึ้น มีการสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบต่างๆเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของแบบจำลองทั้งสองด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย