

ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดในการกัดระนาบเดียว Geometric Distortion of Uncut Chip in One Plane Milling

ฐิตะพล หุຍะนันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ 10530

โทรศัพท์: 0-2988-3655, โทรสาร: 0-2988-3666 ต่อ 3106

E-mail: thuyanan@mut.ac.th

Manuscript received October 8, 2014

Revised November 12, 2014

บทคัดย่อ

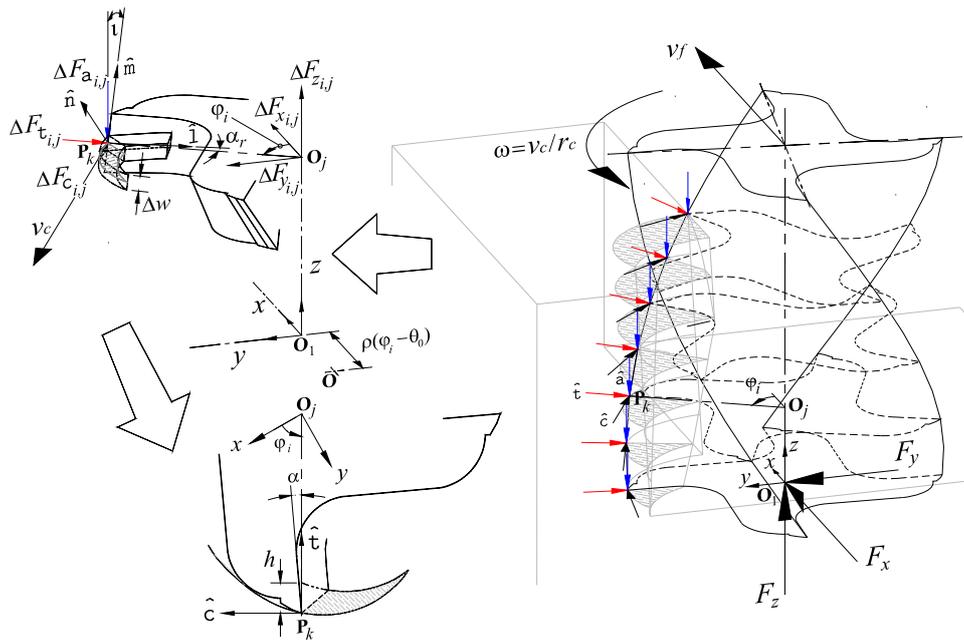
แบบจำลองรูปแบบต่างๆ สำหรับทำนายรูปทรงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดถูกนำเสนอขึ้นมากกว่า 5 ทศวรรษ แต่ก็ยังแปลกใจที่แบบจำลองดั้งเดิม ($h = f_z \cos \theta$) ยังคงเป็นที่ยอมรับและถูกนำมาประยุกต์ในด้านต่าง ๆ แม้ว่ามันจะถูกพัฒนาขึ้นมาจากวิถีคมตัดแบบวงกลมแทนที่จะเป็นแบบ Trochoid ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตระหว่างเศษก่อนขาดจริงและแบบจำลองดั้งเดิมผ่านมุมระหว่างการตัดเฉือนและตัวแปรไร้หน่วยต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ ซึ่งงานนี้นำชุดคำสั่ง VBA for AutoCAD มาประยุกต์เป็นเครื่องมือหลักสำหรับสร้างเศษก่อนขาดและหาลักษณะจำเพาะของมัน โดยวิถี Trochoid ถูกสร้างจากชุดอนุกรมของ Successive point บน Synthetic curve จากผลการศึกษาเชิงเปรียบเทียบพบว่า เกณฑ์ประเมินความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตที่นำเสนอในบทความนี้สามารถนำมาใช้บ่งชี้ความแตกต่างระหว่างเศษก่อนขาดจริงและแบบจำลองดั้งเดิมได้ตามที่ประสงค์ ทำให้หาข้อสรุปได้ว่า แบบจำลองดั้งเดิมสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากวิถีคมตัดที่ถูกทำให้ง่ายเกินความเป็นจริงถ้าสภาวะการตัดเฉือนอยู่ภายใต้เงื่อนไข f_z ไม่เกิน $0.0034D_c$ โดยที่ v_f ไม่เกิน $0.0033v_c$ เท่านั้น

คำสำคัญ: รูปทรงเรขาคณิตของเศษก่อนขาด, การกัดในระนาบเดียว, วิถี Trochoid, ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

ABSTRACT

For over last 5 decades, various models for predicting the uncut chip geometry have been introduced. The conventional ($h = f_z \cos \theta$) model is, surprisingly, still well accepted and applied in many sections despite of being derived from the circular tool trajectory instead of the trochoid one. As a result, this paper presents an analysis of geometric distortion between the actual uncut chip and the conventional model through both the in-cutting angles and the new approached dimensionless parameters. In this works, the VBA for AutoCAD programming was implemented as the main tool for creating uncut chips and determining their characteristics. The trochoid trajectory was generated from a series of successive points on the synthetic curves. According to the comparative study's results, the proposed criteria for assessing the geometric distortion can identify the differentia between the actual uncut chip and the conventional model as expected. It is then possible to draw a conclusion that the use of conventional model is valid regardless of any effects due to its oversimplification if, and only if, the cutting condition is on a good term with f_z and v_f do not exceed $0.0034D_c$ and $0.0033v_c$.

Keywords: Uncut chip geometry, One plane milling, Trochoid trajectory, Geometric distortion.



รูปที่ 1 แนวคิดที่มาของกระบวนการกัดในระนาบเดียวของคมตัดใดๆ

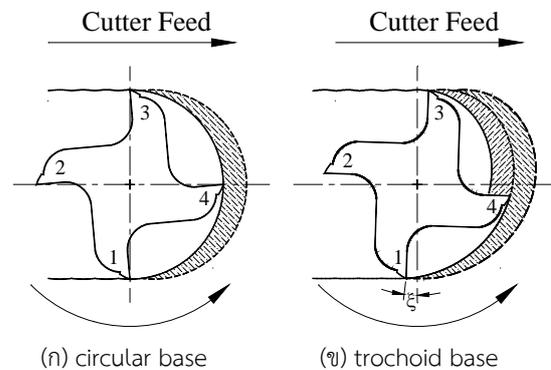
1. บทนำ

การกัดเป็นกระบวนการประเภทหนึ่งของการตัดเฉือนโลหะ ซึ่งกลไกพื้นฐานของกระบวนการขจัดเศษการกัดที่สังเคราะห์จากการตัดเฉือนจุดเดียว ณ แต่ละคมตัดในการกัดระนาบเดียว (ดังรูปที่ 1) โดยปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์กลไกการขจัดเศษในกระบวนการกัดคือความถูกต้องของพารามิเตอร์ของลักษณะจำเพาะเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดซึ่งสังเคราะห์มาจากปัจจัยต่างๆ ต่อไปนี้

- เส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัดและจำนวนคมตัด (D_c, N_z)
- อัตราเร็วของการป้อนมีดและการตัดเฉือน (f_z, v_c)
- ความหนาของเศษก่อนขาด ณ ขณะเวลาใดๆ (h)
- มุมระหว่างการตัดเฉือน ($\theta_{ent}, \theta_{ext}, \theta_{h,max}$)
- ความยาวการตัดเฉือน (L_c)

ตั้งแต่ปี 1941 เป็นต้นมา แม้ว่าจะมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาและนำเสนอแบบจำลองรูปแบบต่างๆ สำหรับทำนายรูปทรงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดได้แม่นยำขึ้นตามลำดับ [1] – [4] เริ่มจากแบบจำลองที่ซับซ้อนยุ่งยากของ Martellotti จนถึงแบบจำลองอย่างกระชับที่ถูกนำเสนอขึ้นมาในช่วงทศวรรษนี้ [5-7] อย่างไรก็ตามแบบจำลองดั้งเดิมที่พัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวงกลมสองวงก็ยังคงถูกนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดในงานด้านต่างๆ ด้วยเหตุนี้บทความนี้จึงเลือกที่จะประยุกต์โปรแกรม AutoCAD มาใช้ศึกษาเศษก่อนขาดในการกัดระนาบเดียวเชิง

เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองดั้งเดิมกับรูปทรงเรขาคณิตเชิงประจักษ์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากเส้นโค้ง Trochoid (ดังรูปที่ 2) เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ความแม่นยำเชิงเรขาคณิตระหว่างเศษก่อนขาดทั้งสองประเภทผ่านมุมระหว่างการตัดเฉือนและตัวแปรไร้หน่วยต่างๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่



รูปที่ 2 รูปทรงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดในระนาบเดียว

2. รูปทรงเรขาคณิตเชิงประจักษ์ของเศษก่อนขาด

แม้ว่าการเคลื่อนที่ของขอบคมตัดของดอกกัดภายใต้สภาวะการทำงานแบบอุดมคติซึ่งไม่มีผลกระทบที่อาจเกิดจาก ดอกกัดเยื้องศูนย์ เฟลาหมุนเอียง ฟันของดอกกัดหมดคม หรือการโก่งตัวของเครื่องจักร เป็นต้น จึงอาจทำให้สมมติได้ว่าการกัดในระนาบเดียวของคมตัดเกิดจากเคลื่อนที่ซ้อนทับของวงกลมขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเท่ากับมิตกัต (ดังรูปที่ 2.ก) แต่ในความเป็นจริงทั้งคมมีดและมิตกัตเคลื่อนที่ไปด้วยกันตลอดกระบวนการตัดเฉือน จึงเป็นผลให้วิถีเคลื่อนที่ของคมมีดมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง Trochoid (ดังรูปที่ 2.ข)

2.1 วิธีคมตัดสำหรับการกัดเซาะร่อง

ในการจำลองวิธีคมตัดของงานวิจัยที่ผ่านทั้งหมดจะอยู่ในรูป Analytic curve ที่สร้างขึ้นเป็นทั้ง Parametric form และ Nonparametric form อย่างไรก็ตามในปี พ.ศ.2554 ฐิตะพลและกฤษฎา ได้นำเสนอการจำลองวิธีคมตัดด้วย Synthetic curve บน AutoCAD [8] เพื่อใช้ศึกษาความหนาของเศษก่อนขาดชั่วคราวและมุมระหว่างการตัดเฉือน ดังนั้นในบทความได้มีการปรับปรุงสมการ Successive point ของคมตัด (ดังรูปที่ 3) จากงานวิจัยข้างต้นเพื่อให้สามารถตอบสนองปัจจัยตั้งต้นตามเงื่อนไขการศึกษาที่ต้องการได้ ดังสมการที่ 1 ข้างล่างนี้

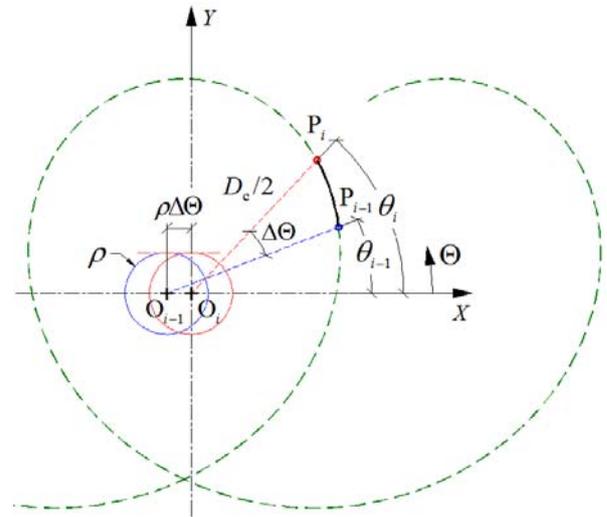
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_i^{(k)} = \frac{f_z}{2\pi} + \begin{bmatrix} 1 - \cos\Delta\Theta & \sin\Delta\Theta \\ -\sin\Delta\Theta & 1 - \cos\Delta\Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_{i-1}^C + \begin{bmatrix} \cos\Delta\Theta & -\sin\Delta\Theta \\ \sin\Delta\Theta & \cos\Delta\Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_{i-1}^{(k)} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_i^C = \frac{f_z}{2\pi} + \begin{bmatrix} \cos\Delta\Theta & \sin\Delta\Theta \\ -\sin\Delta\Theta & \cos\Delta\Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}_{i-1}^C$$

เมื่อ $[X \ Y]_i^{(k)}$ คือตำแหน่งชั่วคราวของคมตัดที่ k ณ increment ที่ i ขณะที่ $[X \ Y]_{i-1}^{(k)}$ คือตำแหน่งก่อนหน้าของคมตัดที่ k ณ increment ที่ $i-1$ โดย $\Delta\Theta$ ก็คือ Angular interval ระหว่าง increment ที่กำหนดขึ้น

ในการทำงานเดียวกันตำแหน่งชั่วคราวของมิตกัต ณ increment ที่ i ก็คือ $[X \ Y]_i^C$ และ $[X \ Y]_{i-1}^C$ ก็คือตำแหน่งก่อนหน้าของมิตกัต ณ increment ที่ $i-1$ โดยการอ้างอิงทิศทางและมุมที่ใช้ในบทความนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของพิกัดฉากและกฎมือขวา

ตลอดทั้งบทความมิตกัตจะมีการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3 Successive point บนเส้นโค้ง Trochoid

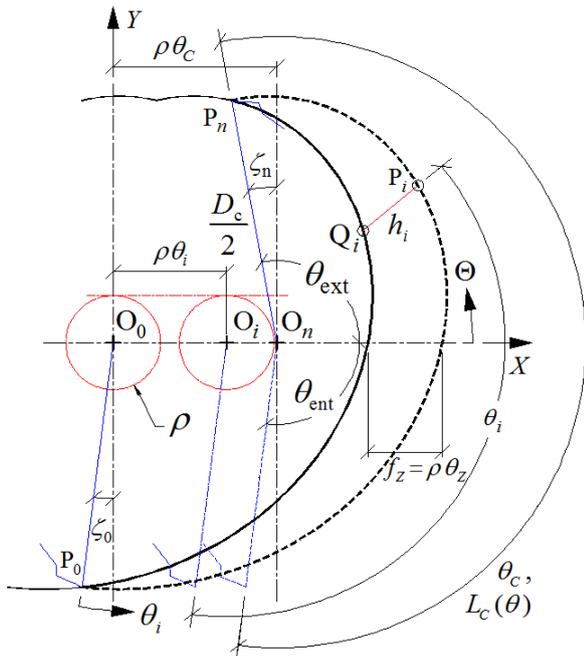
2.2 ลักษณะเฉพาะเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาด

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 จะเห็นว่ากรัดเซาะร่องในระนาบเดียวนั้นจะให้เศษก่อนขาดที่มีลักษณะเฉพาะเชิงเรขาคณิตอันประกอบไปด้วยปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. ความหนาเศษก่อนขาดชั่วคราว (h_i) คือระยะจากตำแหน่งชั่วคราว P_i ของคมตัด ณ increment ที่ i ถึงจุดตัดขอบชิ้นงาน (Intersection) Q_i ในทิศทางเข้าหาจุดศูนย์กลางมิตกัต O_i โดยสามารถหาขนาดความหนาของเศษก่อนขาด ณ increment ที่ i ได้ตามสมการที่ 2

$$h_i = |\overline{PQ}_i| = \sqrt{(X_i^Q - X_i^P)^2 + (Y_i^Q - Y_i^P)^2} \quad (2)$$

ทั้งนี้สามารถหาพิกัดของจุด Q_i ได้โดยใช้ AutoCAD



รูปที่ 4 ลักษณะเฉพาะเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดจริง

ข. มุมระหว่างการตัดเฉือน ($\theta_{ent}, \theta_{ext}$) ประกอบด้วย มุมเข้า θ_{ent} ที่คมตัดเริ่มสัมผัสชิ้นงานและมุมออก θ_{ext} ที่คมตัดหลุดออกจากขอบชิ้นงาน ทั้งนี้สามารถระบุค่าของมุมทั้งสองได้จากค่าของ Angular displacement ขณะที่ความหนาเศษก่อนขาดเท่ากับศูนย์ ($h_0 = h_n = 0$) ตามที่แสดงเอาไว้ดังสมการที่ 3 ต่อไปนี้

$$\theta_{ent} = \tan^{-1} \frac{Y_0^P - Y_0^C}{X_0^P - X_0^C} \text{ และ } \theta_{ext} = \tan^{-1} \frac{Y_n^P - Y_n^C}{X_n^P - X_n^C} \quad (3)$$

ข. ความยาวการตัดเฉือน (L_c) คือระยะทางที่คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานซึ่งเป็นที่มาของความสึกหรอของมีด ดังนั้นในสมการ Taylor's tool life จึงกำหนดให้ปัจจัยนี้ใช้แสดงอายุการใช้งานของมีด โดยการหาขนาดความยาวการตัดเฉือนนั้นสามารถคิดได้จาก Incremental cutting จำนวน n ครั้ง ดังแสดงได้ดังสมการที่ 4

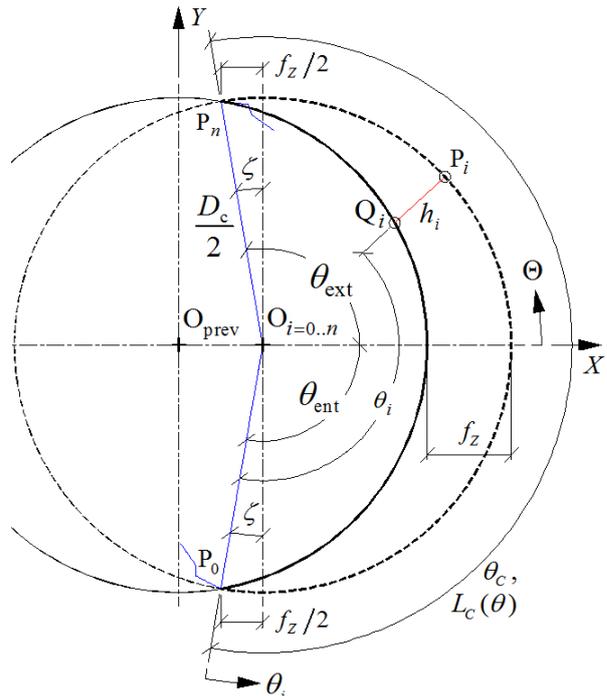
$$L_c = \sum_{i=1}^n D_c \sin \frac{\Delta\Theta_i}{2} \quad (4)$$

เป็นที่น่าสังเกตว่า ในทางปฏิบัติค่าของ $\Delta\Theta_1$ และ $\Delta\Theta_n$ มักจะน้อยกว่า $\Delta\Theta$ ระหว่างการตัดเฉือนที่กำหนดไว้ โดยสามารถหาค่าของ $\Delta\Theta_1$ และ $\Delta\Theta_n$ ได้จากสมการที่ 5

$$\Delta\Theta_1 = \theta_1 - \theta_{ent} \text{ และ } \Delta\Theta_n = \theta_{n-1} - \theta_{ent} \quad (5)$$

3. การเตรียมการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ

ขณะที่เศษก่อนขาดแบบดั้งเดิมนั้นเกิดการซ้อนทับของวงกลม 2 วงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด D_c เท่ากับมีดกัด โดยมีระยะห่างระหว่างวงกลมทั้งสองเท่ากับอัตราการป้อนต่อฟัน f_z โดยลักษณะเฉพาะเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดแบบดั้งเดิมนี้สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะเฉพาะเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดแบบดั้งเดิม

แต่ในทางปฏิบัติรูปโครงสร้างของความหนาเศษก่อนขาดแบบดั้งเดิมกลับเป็นไปตามแบบจำลองอย่างง่ายดังแสดงไว้ในสมการที่ 6 โดยสมมติให้มุมเข้า θ_{ent} และมุมออก θ_{ext} อยู่ที่ -90° และ 90° ตามลำดับ

$$h(\theta) = f_z \cos \theta \quad (6)$$

3.1 เกณฑ์สำหรับประเมินความเพี้ยนเชิงเรขาคณิต

เมื่อพิจารณารูปที่ 4 และ 5 ประกอบกับแบบจำลองความหนาเศษก่อนขาดชั่วคราวตามสมการที่ 6 แล้ว จึงนำมาสู่การตัดสินใจว่า เกณฑ์ที่นำมาใช้วิเคราะห์ความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตในบทความนี้ ต้องประกอบด้วย มุมสำคัญการตัดเฉือนและตัวแปรไร้หน่วยที่ใช้

ประเมินผลกระทบของความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตต่อความสามารถในการตัดเฉือนของคมตัดภายใต้สภาวะอุดมคติ ดังต่อไปนี้

ก. ความเพี้ยนของรูปโคจรร่าง ประเมินจากค่าแตกต่างของสัดส่วนความหนาเศษก่อนขาดต่ออัตราป้อนต่อฟัน ณ มุม θ ใด ๆ ตั้งแต่ -90° ถึง 90° ตามสมการที่ 7

$$\frac{\Delta h_i}{f_z} = \frac{h_{tro}(\theta_i) - h_{cir}(\theta_i)}{f_z} \quad \text{โดย } -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ \quad (7)$$

โดยที่ $h_{tro}(\theta_i)$ และ $h_{cir}(\theta_i)$ คือความหนา ณ มุม θ_i ของเศษก่อนขาดจริงและเศษก่อนขาดดั้งเดิมตามลำดับ

ข. ความเพี้ยนของภาวะการขจัดเศษ ประเมินร่วมจากเกณฑ์ย่อย 2 กลุ่ม ณ f_z/D_c และ v_f/v_c ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) ความเพี้ยนย่อยของภาวะการขจัดเศษเฉลี่ย ได้แก่

- ค่าแตกต่างเฉลี่ยของสัดส่วนความหนาเศษก่อนขาดต่ออัตราป้อนต่อฟัน ($\Delta \bar{h}/f_z$) ตามสมการที่ 8

$$\frac{\Delta \bar{h}}{f_z} = \frac{1}{L_c} \sum_{i=0}^n \frac{h_{tro}(\theta_i) - h_{cir}(\theta_i)}{f_z} \quad (8)$$

ขณะที่ความยาวการตัดเฉือน (L_c) หาได้ตามสมการที่ 3

- ค่าแตกต่างของสัดส่วนความยาวการตัดเฉือนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีดกัด ($\Delta L_c/D_c$)

(2) ความเพี้ยนย่อยของภาวะการขจัดเศษสูงสุด ได้แก่

- ค่าแตกต่างของสัดส่วนความหนาเศษก่อนขาดสูงสุดต่ออัตราป้อนต่อฟัน ($\Delta h_{max}/f_z$) ตามสมการที่ 9

$$\frac{\Delta h_{max}}{f_z} = \frac{h_{tro}^*(\theta_i) - h_{cir}^*(\theta_i)}{f_z} \quad (9)$$

โดย $h_{tro}^*(\theta_i)$ และ $h_{cir}^*(\theta_i)$ คือความหนาสูงสุด ณ มุม θ_i ของเศษก่อนขาดจริงและเศษก่อนขาดดั้งเดิม

- ค่าแตกต่างของมุม ณ ความหนาเศษสูงสุด ($\Delta \theta_{h,max}$)

ค. ความเพี้ยนที่ส่งผลต่อความเรียบผิว ประเมินร่วมจากมุมเข้า θ_{ent} และมุมออก θ_{ext} ณ f_z/D_c และ v_f/v_c ต่าง ๆ

3.2 ขั้นตอนการประมวลผล

การสร้างรูปทรงเรขาคณิตเชิงประจักษ์เศษก่อนขาดในการกัดระนาบเดียวที่นำมาวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบกันระหว่างเศษก่อน

ขาดจริงที่สังเคราะห์ขึ้นจากเส้นโค้ง Trochoid (ตามสมการที่ 1 และ 2) กับเศษก่อนขาดแบบดั้งเดิมที่สังเคราะห์ขึ้นจากเส้นโค้งวงกลมร่วมกับแบบจำลองความหนาชั่วขณะแบบดั้งเดิมตามสมการที่ 6 นั้น สำเร็จได้ด้วยการประยุกต์การทำงานของชุดคำสั่งของ VBA for AutoCAD มาร่วมตามขั้นตอนต่าง ๆ ต่อไปนี้

(1) กำหนด D_c และ f_z จากข้อมูลของผู้ผลิตมีดกัด (ดังในตารางที่ 1) รวมทั้งค่าใช้งานที่เหมาะสมของ Angular increment ซึ่งในบทความนี้เลือกใช้ $\Delta \Theta = 0.4^\circ$ อนึ่งค่า v_f/v_c ในบทความนี้หาได้โดยอ้อมจากสมการที่ 10

$$\frac{v_f}{v_c} = \frac{N_z}{\pi} \cdot \frac{f_z}{D_c} \quad \text{เมื่อ } N_z \text{ คือจำนวนคมตัดของมีดกัด} \quad (10)$$

ตารางที่ 1 ค่า f_z/D_c และ v_f/v_c ที่เลือกใช้

D_c	f_z	f_z/D_c	N_z	D_c	f_z	v_f/v_c
1	0.002	0.0020	1	10	0.055	0.0011
5	0.011	0.0022	3	16	0.055	0.0033
10	0.027	0.0027	4	20	0.078	0.0050
16	0.055	0.0034	6	20	0.078	0.0074
20	0.078	0.0039	8	20	0.078	0.0099
25	0.110	0.0044	8	25	0.110	0.0112

(2) สร้าง Trochoidal workpiece edge

(3) ระบุตำแหน่ง Trochoidal trajectory vertices P_i^{tro} ในช่วง $-91.2^\circ \leq \theta_i^{tro} \leq 91.2^\circ$

(4) สร้างชุดอนุกรมของ Radial line segment \overline{PO}_i^{tro}

(5) เล็มส่วนที่ยื่นเกิน Trochoidal workpiece edge ของแต่ละ Radial line segment ที่ ณ จุดตัด Q_i^{tro} จึงทำให้ได้ชุดอนุกรมของ Height segments \overline{PQ}_i^{tro}

(6) ระบุตำแหน่ง Circular trajectory vertices P_i^{cir}

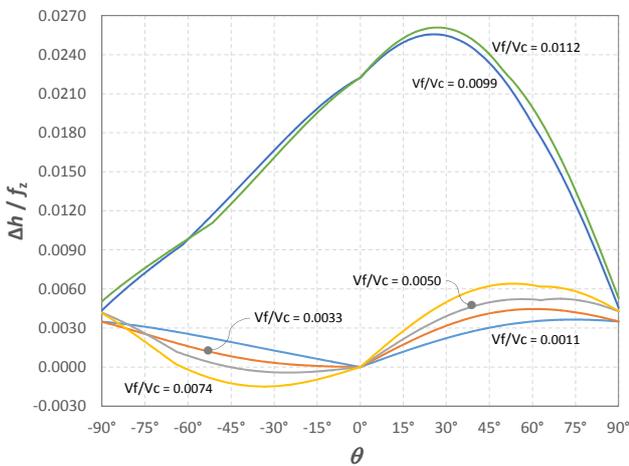
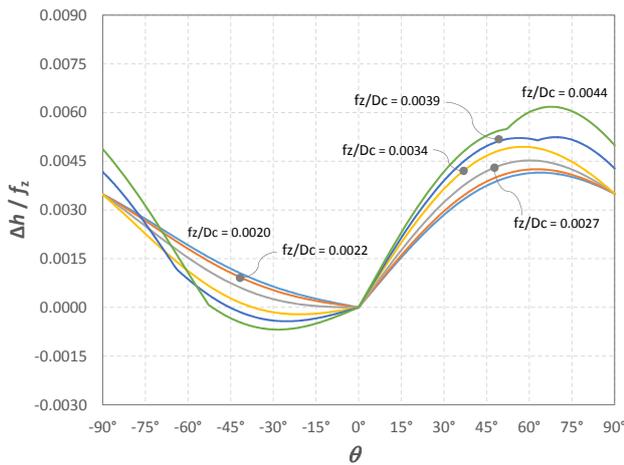
(7) สร้างชุดอนุกรมของ Height segments \overline{PQ}_i^{cir} ด้วย Line segment ($-h_i \angle \theta_i$) จากแต่ละ Vertex P_i^{cir} ในช่วง $-90^\circ \leq \theta_i^{cir} \leq 90^\circ$

(8) คำนวณหาลักษณะเฉพาะของเศษก่อนขาดทั้งสองแบบจากชุดข้อมูล Height segments ทั้งของ \overline{PQ}_i^{cir} และ \overline{PQ}_i^{tro}

(9) นำค่าลักษณะเฉพาะที่คำนวณได้ของเศษก่อนขาดทั้งสองมาวิเคราะห์หาค่าความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตตามเกณฑ์หลักทั้งสามที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้

4. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

บทความนี้มีเป้าหมายหลักอยู่ที่การทำความเข้าใจเกี่ยวกับความแตกต่างอันเกิดมาจากความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตของเศษก่อนขาดในการกัดระนาบเดียว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงการวิเคราะห์แรงในการกัดรวมไปถึงความสมบูรณ์ของผิวกัด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำเกณฑ์ความเพี้ยนข้างต้นมาประเมินภายใต้สภาวะงานกัดด้วยค่าแนะนำในช่วงที่ใช้งานอยู่จริงจากข้อมูลของผู้ผลิต



รูปที่ 8 ความเพี้ยนของรูปโครงสร้าง

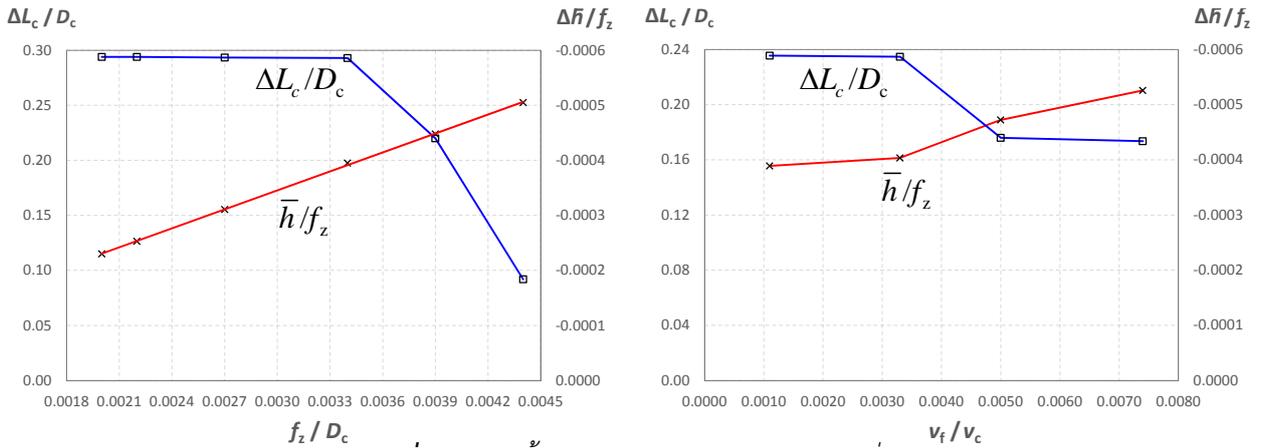
พิจารณาจากรูปที่ 8 พบว่า การประเมินความเพี้ยนของรูปโครงสร้างทำได้แต่ในช่วง $-90^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$ เนื่องจากเศษก่อนขาดแบบดั้งเดิมถูกจำกัดอยู่ในช่วงนี้เท่านั้น โดยค่า $\Delta h / f_z$ มีการเปลี่ยนแปลงไปในแนวโน้มเดียวกันตลอดทั้งช่วง f_z / D_c แต่ไม่เกินช่วง v_f / v_c เท่ากับ 0.0074 ซึ่งค่า สูงสุดของความเพี้ยนของรูป

โครงสร้างมากกว่าค่าสูงสุดในช่วง v_f / v_c ที่ต่ำกว่าถึง 4 เท่า ดังนั้นการประเมินเกณฑ์ความเพี้ยนที่เหลือนี้จะทำในช่วง v_f / v_c ไม่เกินกว่า 0.0074 เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า $\Delta h / f_z$ ในช่วงที่สนใจจะมีค่าเพี้ยนประมาณ -0.0015 ถึง 0.0060 โดยจะเข้าใกล้ศูนย์ ณ บริเวณมุม θ เท่ากับศูนย์ อีกข้อสังเกตสำคัญที่พบคือ เศษก่อนขาดการจากกัดเซาะร่องที่มีความเพี้ยนของรูปโครงสร้างน้อยที่สุดเกิดขึ้นเมื่อ $v_f / v_c \approx 0.0033$ และ $f_z / D_c \approx 0.0020$ โดยความเพี้ยนของรูปโครงสร้างนี้จะสูงมากเมื่อ $f_z / D_c > 0.0034$ และ $v_f / v_c > 0.0074$ ส่วนการประเมินความเพี้ยนของภาระการขัดเศษนั้นทำได้โดยการพิจารณาเกณฑ์ความเพี้ยนย่อย 2 ตัว (ดังในรูปที่ 9 และ 10) ร่วมกัน พบว่า L_c / D_c จะแปรผันแบบเชิงเส้น ตาม f_z / D_c ที่ อัตราการเท่ากับ 57.446 ด้วยค่า $R^2 = 0.9997$ แต่ไม่สามารถระบุรูปแบบที่ชัดเจนของความสัมพันธ์ระหว่าง L_c / D_c กับ v_f / v_c ได้ในบทความนี้ โดย $\Delta \bar{h} / f_z$ จะค่อนข้างคงที่ภายใต้ $STD < 0.0002$ เมื่อ $f_z / D_c < 0.0034$ และ $v_f / v_c < 0.0033$ ขณะที่ $\Delta \theta_{h,max}$ จะคงที่อยู่ที่ค่าประมาณ 0.4° ตลอดช่วง f_z / D_c และในช่วง $0.0011 < v_f / v_c < 0.0033$ โดยที่ $\Delta h_{max} / f_z$ นั้น จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับทั้ง f_z / D_c และ v_f / v_c ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 8.826×10^{-3} และ 7.441×10^{-3} ด้วยค่า R^2 เท่ากับ 0.9986 และ 0.9972 ตามลำดับ

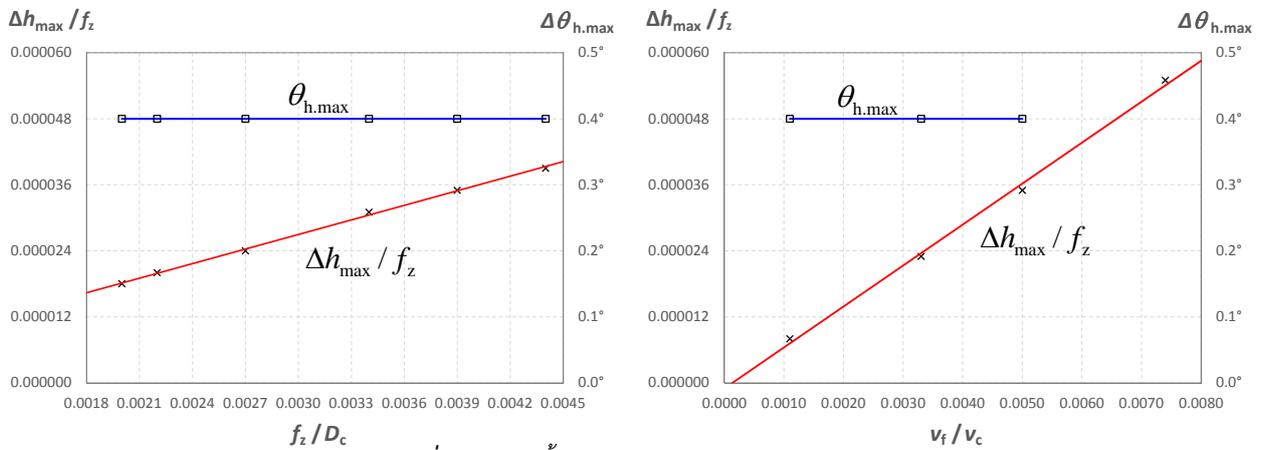
สำหรับความเพี้ยนที่ส่งผลต่อความเรียบผิวสามารถประเมินได้จากการพิจารณารูปที่ 11 พบว่า ทั้งมุมเข้า θ_{ent} และมุมออก θ_{ext} จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นทั้งกับ f_z / D_c และ v_f / v_c ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 58.413 และ -56.976 ด้วยค่า R^2 เท่ากับ 0.9998 และ 0.9997 ตามลำดับ ขณะที่ทั้งมุมเข้า θ_{ent} และมุมออก θ_{ext} จะมีค่าค่อนข้างคงที่ซึ่งใกล้เคียงกันเมื่อ $v_f / v_c < 0.0033$ ด้วยค่า STD ประมาณ 0.9998 และ 0.9997 ตามลำดับ สุดท้ายยังพบข้อสังเกตที่น่าสนใจประการหนึ่ง นั่นคือ มุมเข้า θ_{ent} และมุมออก θ_{ext} ของเศษก่อนขาดจริงจะเท่ากับ -90° และ 90° ตามลำดับเมื่อค่าของ $f_z / D_c = 0$

5. สรุป

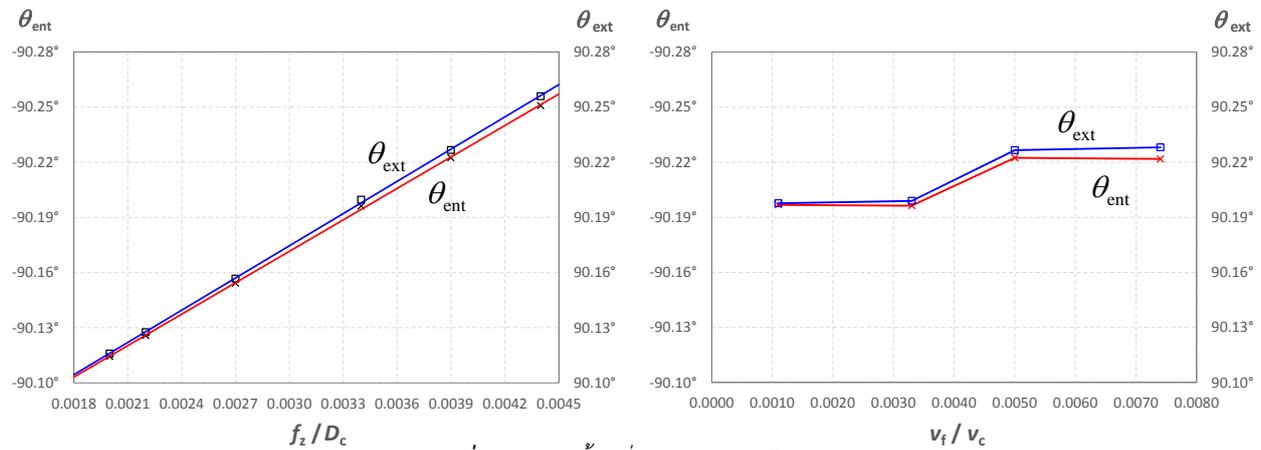
จากผลการประเมินความเพี้ยนเชิงเรขาคณิตตามเกณฑ์ซึ่งถูกนำเสนอขึ้นมาใหม่ในบทความนี้พบว่า เกณฑ์ต่าง ๆ เหล่านี้



รูปที่ 9 ความเปลี่ยนแปลงของภาวะการขจัดเศษเฉลี่ย



รูปที่ 10 ความเปลี่ยนแปลงของภาวะการขจัดเศษสูงสุด



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ส่งผลต่อความเรียบผิว

สามารถนำมาใช้บ่งชี้ความแตกต่างระหว่างเศษก่อนขาดจริงและแบบจำลองดั้งเดิมได้อย่างละเอียดแม่นยำตามที่ประสงค์ เมื่อ

พิจารณาค่าความเปลี่ยนแปลงเชิงเรขาคณิตระหว่างเศษก่อนขาดทั้งสามด้านแล้วก็สามารถชี้ประเด็นสำคัญต่าง ๆ ต่อไปนี้ออกมาได้

(1) เมื่อพิจารณาในแง่ความเพี้ยนของรูปโครงสร้างพบว่าแบบจำลองดั้งเดิมทดแทนเศษก่อนขาดจริงได้ตลอดทั้งช่วง f_z/D_c ที่เลือกใช้ โดยช่วง v_f/v_c ต้องไม่เกิน 0.0074

(2) เมื่อพิจารณาในแง่ความเพี้ยนของของภาระการจัดเศษพบว่าแบบจำลองดั้งเดิมทดแทนเศษก่อนขาดจริงได้ตลอดช่วง $f_z/D_c < 0.0027$ โดย v_f/v_c ต้องอยู่ในช่วงระหว่าง 0.0011 ถึง 0.0033 เนื่องจาก L_c/D_c จะคงที่ ในขณะที่ $\theta_{h,max}^{cir}$ จะมีค่าน้อยกว่า $\theta_{h,max}^{tro}$ อยู่ประมาณ 0.4° และ h_{max}^{cir} จะมีค่าน้อยกว่า h_{max}^{tro} ไม่ถึง $0.000024f_z$

(3) เมื่อพิจารณาในแง่ความเพี้ยนที่ส่งผลต่อความเรียบผิวพบว่า θ_{ent} และ θ_{ext} มีค่าเฉลี่ยประมาณ $\pm 90.20^\circ$ ในช่วง v_f/v_c ระหว่าง 0.0011 ถึง 0.0033 โดยจะมีค่าเปลี่ยนแปลงดังแสดงในสมการที่ 11

$$\begin{aligned}\theta_{ent} &= -90^\circ - 56.976f_z/D_c \\ \theta_{ext} &= +90^\circ + 58.413f_z/D_c\end{aligned}\quad (11)$$

เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองดั้งเดิมสามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากวิถีคมตัดที่ถูกทำให้ง่ายเกินความเป็นจริงถ้าสภาวะการตัดเฉือนอยู่ภายใต้เงื่อนไข f_z ไม่เกิน $0.0034D_c$ โดยที่ v_f ไม่เกิน $0.0033v_c$ เท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Martellotti M.E., *An Analysis of the milling process*, Trans. ASME 63, 677–700, 1941.
- [2] Martellotti M.E., *An analysis of the milling process. Part II. Down milling*, Trans. ASME 67, 233–251, 1945.
- [3] Spiewak S.A., *Analytical modeling of cutting point trajectories in milling*, ASME J. Eng. Indus. 116, 440–448, 1994 .
- [4] Spiewak S.A., *An improved model of the chip thickness in milling*, Ann. CIRP 44 (1), 39–42, 1995 .
- [5] Li H.Z., Liu K., Li X.P., A New method for determining the undeformed chip thickness in milling, J. Mater. Process. Technol. 113, 378–384, 2001.
- [6] Huynan T., *Development of a Hybrid End Milling Analysis System*, Ph.D Thesis, University of Sheffield, UK, 2003.
- [7] Kumanchik L.M., Schmitz T.L., *Improved analytical chip thickness model for milling*, Precis. Eng. 31, 317–324, 2007.
- [8] จิตะพล หุยนันท์, กฤษฎา ไสสุวรรณ, การศึกษาลักษณะจำเพาะของเศษก่อนขาดระหว่างการเซาะร่องด้วยดอกกัดที่ผันตรงผ่านการจำลองเส้นทางการตัดด้วย VBA สำหรับ AutoCAD, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่ 19 - 21 ตุลาคม 2554



จิตะพล หุยนันท์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี 2534 จบการศึกษาระดับปริญญาโทจาก Coventry University ประเทศอังกฤษ ปี 2540 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Sheffield ประเทศอังกฤษ ปี 2547 ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร งานวิจัยเน้นทางกลศาสตร์วัสดุ การวิเคราะห์เชิงไฟไนท์อีลิเมนต์ คอมพิวเตอร์ช่วยสำหรับการออกแบบและการผลิต