

엔드밀링 가공성 개선을 위한 절삭칩 단면적의 분석

The Analysis of Sectional Cutting Chip Area for End-milling Machinability Improvement

*이익현¹, 박기범², 황종대³, #정윤교⁴

* I. H. Lee¹, K. B. Park², J. D. Hwang³, # Y. G. Jung(ygjung@changwon.ac.kr)⁴
^{1,4} 창원대학교 기계공학과, ²창원대학교 대학원 기계공학과, ³창원대학교 TIC

Key words : 5 axis Control Machining, Post Processor, E-Post

1. 서론

엔드밀을 사용한 절삭가공에서 단위시간당 제거되는 소재의 체적 변동은 절삭저항의 변동과 공구 떨림 등의 악영향을 미치며 이로 인한 가공표면 조도의 저하, 과절삭에 따른 가공오차 증가, 공구수명 저하와 같은 가공성 저하를 야기한다. 단위시간당 제거되는 소재의 체적인 소재제거율은 절삭칩 단면적과 공구 이송속도의 곱으로 구성되며 절삭칩 단면적에 대한 명확한 분석을 통하여 이송속도를 제어할 수 있고 이를 통하여 일정한 소재제거율을 얻을 수 있게 된다. 따라서 임의 가공 형태에서의 절삭칩 단면적을 해석적으로 규명하여 원하는 소재제거율을 일정하게 유지할 필요성이 제기되고 있으며 관련 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 기존의 연구들은^{(1), (2)} 주로 절삭 가공의 어떤 일부 형태만을 모델로 하고 있어 5축가공을 포함한 다양한 경우에서의 절삭칩 단면적 분석을 통합적으로 규명하기에는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 다양한 경우의 가공 형태에 대한 절삭칩 단면적을 분석함으로써 엔드밀링 가공성 개선을 위한 기반 자료로 삼고자 한다.

2. 평엔드밀링에서의 절삭칩 단면적 분석

엔드밀링의 가공형태는 크게 평엔드밀링과 볼엔드밀링으로 나눌 수 있고 각각의 경우에서 평면, 볼록, 오목 곡면 및 곡면의 곡률반경을 포함한 공작물의 형태에 따라 구분된다. 또한 공구의 자세가 3축가공인 경우와 5축가공인 경우로 나눌 수 있으며 절입깊이, 스텝오버량, 공구반경 등의 가공조건으로 정의된다. 여기서 일반화하기 힘든 요소인 평엔드밀링과 볼엔드밀링의 2가지 요소로 수식을 정리하고 나머지 변수는 일반식에 포함하였다.

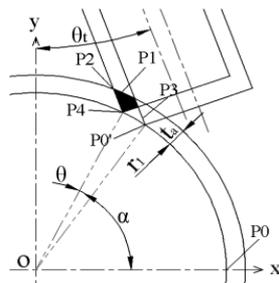


Fig. 1 Schematic of sectional cutting chip area in the flat endmilling

Fig. 1은 평엔드밀을 사용한 밀링가공에서의 절삭칩 단면적을 분석하기 위한 개념도로서 피크피드 방향의 스텝오버량인 l_f 와 가공곡면의 원점이 이루는 각도는 다음의 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \frac{l_f \times 360}{2 \cdot \pi \cdot r_1} \quad (1)$$

Where, l_f : Step over length, r_1 : Radius of surface
 θ : Angle between step over and origin of surface

식 (1)에서 구한 α 와 θ 를 이용하여 회전변환과 연립방정식을 구함으로써 식 (2)와 같이 단면적 계산을 위한 점(P0~P3_x)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P0 &: [x, y, z] : \text{Original cutter contact point} \\ P0' &: [x', y', z'] = P0[R(\alpha)] \\ P4 &: [x'', y'', z''] = [x', y', z']R(\theta) \\ P1_x &: y = (x - x') \cot \theta_t + y' \\ P2_x &: y = (x - x'') \cot \theta_t + y'' \\ P3_x &: -(x - x'') \tan \theta_t + y'' = (x - x') \cot \theta_t + y' \end{aligned} \quad (2)$$

Where θ_t : Tilt angle of tool

식 (2)에서 구한 점(P1_x~P4)을 이용하여 식 (3)과 같이 절삭칩 단면적 A_s 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_s &= \int_{x_3}^{x_1} ((x - x') \cot \theta_t + y') dx + \int_{x_1}^{x_2} (y) dx \\ &\quad - \int_{x_3}^{x_1} (-(x - x'') \tan \theta_t + y'') dx \\ &\quad - \int_{x_1}^{x_2} ((x - x'') \cot \theta_t + y'') dx \end{aligned} \quad (3)$$

Where, A_s : Sectional cutting chip area

평엔드밀인 경우 볼록곡면과 오목곡면에 대한 조건은 다음의 식 (4)과 같이 정의하여 각 경우에 대하여 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{If convex, } y &= \sqrt{(r_1 + t_a)^2 - x^2}, \\ \text{If concave, } y &= -\sqrt{(r_1 - t_a)^2 - x^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Where, t_a : Depth of cut

3. 볼엔드밀링에서의 절삭칩 단면적

Fig. 2는 볼엔드밀을 사용한 밀링가공에서의 절삭칩 단면적을 분석하기 위한 개념도이다.

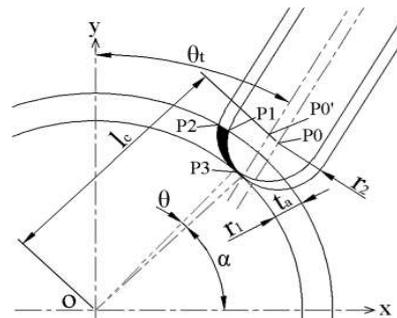


Fig. 2 Schematic of sectional cutting chip area in the ball endmilling

식 (1)에서 구한 α 와 θ 를 이용하여 회전변환과 연립방정식을 구함으로써 식 (5)와 같이 점(P0~P3_x)을 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P0 &: [x', y', z'] = [l_c, 0, 1]R(\alpha) \\ P1_x &: [x'', y'', z''] = P0[R(\theta)] \\ P1_x &: y = -\sqrt{r_2^2 - (x - x')^2} + y' \\ P2_x &: y = -\sqrt{r_2^2 - (x - x'')^2} + y'' \end{aligned}$$

$$P3_x: -\sqrt{r_2^2 - (x-x')^2} + y' = -\sqrt{r_2^2 - (x-x'')^2} + y'' \quad (5)$$

Where, r_2 : Radius of cutter

l_c : Length between the center of r_1 and the center of r_2

식 (5)에서 구한 점($P1_x \sim P3_x$)을 이용하여 식 (6)과 같이 절삭칩 단면적 A_s 를 구할 수 있다.

$$A_s = \int_{x_5}^{x_3} (-\sqrt{-r_2^2 - (x-x')^2} + y') dx + \int_{x_3}^{x_1} ((x-x') \cot \theta_t + (y' - r_2 \cos \theta_t)) dx + \int_{x_1}^{x_2} (y) dx - \int_{x_5}^{x_4} (-\sqrt{r_2^2 - (x-x'')^2} + y'') dx - \int_{x_4}^{x_2} ((x-x'') \cot \theta_t + (y'' - r_2 \cos \theta_t)) dx \quad (6)$$

블엔드밀인 경우 볼록곡면과 오목곡면에 대한 조건은 다음의 식 (7)과 같이 정의하여 각 경우에 대하여 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{If convex, } y &= \sqrt{(r_1 + t_a)^2 - x^2}, l_c = (r_1 + r_2) \\ \text{If concave, } y &= -\sqrt{(r_1 - t_a)^2 - x^2}, l_c = (r_1 - r_2) \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 3은 블엔드밀의 직선날부가 가공에 관여하는 경우의 개념도로서 Fig. 2와 같이 직선날부가 가공에 관여하는 경우와는 차이가 있다. 절삭칩 단면적을 구하기 위한 점($P0 \sim P5_x$)은 식 (8)을 통하여 구할 수 있고 이를 통하여 식 (9)과 같이 절삭 단면적을 구할 수 있다.

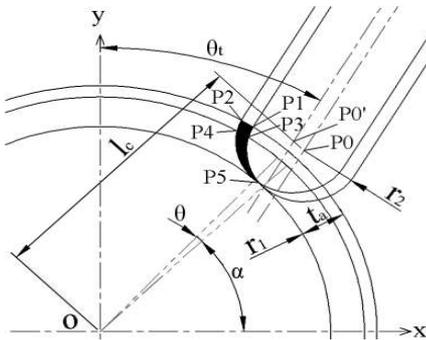


Fig. 3 Schematic of sectional cutting chip area in the ball endmilling with straight flute contacted

When ball endmill ($t_a > t_{max}$)

$$\begin{aligned} P0 : [x', y', z'] &= [l_c, 0, 1][R(\alpha)] : \text{Center of cutter} \\ P0' : [x'', y'', z''] &= [x', y', z'] [R(\theta)] \\ P3_x : [x_3, y_3, z_3] &= [0, r_2, 1][R(90 + \theta_t)] + [x', y', z'] \\ P4_x : [x_4, y_4, z_4] &= [0, r_2, 1][R(90 + \theta_t)] + [x'', y'', z''] \\ P1_x : y &= (x - x_3) \cot(-\theta_t) + y_3 \\ P2_x : y &= (x - x_4) \cot(-\theta_t) + y_4 \\ P5_x : -\sqrt{r_2^2 - (x-x')^2} + y' &= -\sqrt{r_2^2 - (x-x'')^2} + y'' \end{aligned} \quad (8)$$

$$A_s = \int_{x_5}^{x_3} (-\sqrt{-r_2^2 - (x-x')^2} + y') dx + \int_{x_3}^{x_1} ((x-x_3) \cot(-\theta_t) + y_3) dx + \int_{x_1}^{x_2} (y) dx - \int_{x_5}^{x_4} (-\sqrt{r_2^2 - (x-x'')^2} + y'') dx - \int_{x_4}^{x_2} ((x-x_4) \cot(-\theta_t) + y_4) dx \quad (9)$$

Where, t_{max} : Maximum depth of cut without straight flute contacted

4. 절삭칩 단면적 분석결과

유도한 절삭칩 단면적의 일반식을 검증하기 위하여 아래의 Table 1과 같은 절삭조건을 동일하게 적용한 후 유도한 일반식에 의한 단면적과 상용 CAD S/W에 의한 단면적을 상호 비교하였다. 비교 결과 Table 2 및 Table 3과 같은 10가지 가공형태에서 대부분 미소한 오차범위에서 일치하는 결과를 보였다.

Table 1 Cutting condition in this endmilling

	Plane milling	Surface milling		Surface milling with tilt angle	
		convex	concave	convex	concave
Depth of cut, t_a	2	2	2	2	2
Step over, l_f	1	1	1	1	1
Radius of surface, r_1	20	20	20	20	20
Radius of tool, r_2	6	6	6	6	6
Initial Rotation angle, α	45	45	135	45	135
Tilt angle of tool, θ_t	0	0	0	10	-10

Table 2 Compare between A_d and A_s in flat endmilling

	Plane milling	Surface milling		Surface milling with tilt angle	
		convex	concave	convex	concave
$A_s (mm^2)$	2	1.6781	1.8879	1.6208	1.8247
$A_d (mm^2)$	2	1.6771	1.8877	1.6206	1.8245
Machining shape					

Table 3 Compare between A_d and A_s in ball endmilling

	Plane milling	Surface milling		Surface milling with tilt angle	
		convex	concave	convex	concave
$A_s (mm^2)$	1.993	1.9863	1.9669	2.077	2.4444
$A_d (mm^2)$	1.993	1.9862	1.9669	2.0772	2.4446
Machining shape					

5. 결론

- 엔드밀링의 가공성 개선에 영향을 주는 절삭칩단면적을 크게 3가지 유형의 일반식으로 유도하였다.
- 유도한 칩단면적의 일반식을 10가지 경우의 엔드밀링에 적용하여 상용 CAD S/W와 비교한 결과 미소한 오차범위에서 일치하는 결과를 보였다
- 절삭칩단면적을 분석함으로써 소재제거율에 따른 이송률 제어가 가능하게 되어 가공성 개선을 위한 기반자료가 구축되었다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 시행하는 2009 항공우주부품기술 개발사업 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- T. J. Ko, H. S. Kim, S. H. Park, "Machineability in NURBS interpolator considering constant material removal rate," International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 665-671, 2005
- D. H. Sin, J. N. Joo, "Feedrate Optimization Algorithm Considering Cutting Force in Sculptured Surface Ball-End Milling," Department of Mechanical Design Engineering Graduate School of Seoul National University, 2000