

경사절삭 모델에 의한 상향 엔드밀링절삭 해석

이영문(경북대 기계공학부), 송태성(경북대 대학원), 심보경*(경북대 대학원)

Analysis of the Up End Milling Process by Transforming to the Equivalent Oblique Cutting Model

Y. M. Lee (Kyungpook National Univ.),
T. S. Song, B. K. Shim (Graduate School, Kyungpook National Univ.)

ABSTRACT

In end milling process the undeformed chip thickness and the cutting force components vary periodically with phase change of the tool. In this study, up end milling process is transformed to the equivalent oblique cutting. The varying undeformed chip thickness and the cutting force components in end milling process are replaced with the equivalent average ones. Then it can be possible to analyze the chip-tool friction and shear process in the shear plane of the end milling process by the equivalent oblique cutting model. According to this analysis, when cutting SM45C steel, 82% of the total energy is consumed in the shear process and the balance is consumed in the friction process.

Key Words : Up end milling(상향절삭), Oblique cutting(경사절삭), Helix angle(나선각), Specific friction energy(비마찰에너지), Specific shear energy(비전단에너지), Specific cutting energy(비절삭에너지)

1. 서론

최근 공구 제어기술의 발달과 함께 엔드밀링절삭 공정은 금형의 윤곽가공 등 복잡한 형상의 제품가공 시 높은 생산성과 고정밀도를 얻을 수 있어 항공기 및 자동차 산업에 필요한 금형제작등 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되고 있다.

엔드밀공정은 일정한 절삭깊이로 진행되는 절삭 방식과는 달리 미변형칩두께(undeformed chip thickness)가 연속적으로 변하는 단속절삭이며, 한 개 이상의 절삭날이 동시에 작용하는 가공이므로 그 실제적인 해석이 간단하지 않다.

Martellotti⁽¹⁾는 공구와 피삭재의 기하학적 및 운동학적 관계에 대한 고찰을 통하여 상향 및 하향 밀링공정에서의 공구경로에 따른 미변형칩두께 변화에 대한 이론적인 관계를 정립하였다. Tlustý와 Macneil⁽²⁾은 엔드밀의 기하학적인 형상과 절삭조건에 따라 연속적으로 변하는 미변형칩두께 사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과 미변형칩의 단면적의 곱으로 나타내어 실제 측정값과의 차이를 비교하였다.

절삭과정은 그 본질에 있어 칩 생성과정이며, 칩 생성은 전단역이라 불리는 극히 한정된 영역에서

매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다.

절삭상태는 전단소성변형의 크기, 속도 및 저항과 칩-공구 경사면의 마찰계수, 마찰속도 및 마찰과정에 따라 크게 달라지며, 이들 절삭변수에 의해 특징지어지는 전단과정과 마찰과정은 독립적으로 일어나지 않으며 서로 영향을 미치면서 절삭과정의 구간을 이룬다.⁽³⁾

따라서 금속절삭연구에 있어 가장 기초적인 문제는 상기한 전단소성변형 거동과 칩-공구 경사면의 마찰거동에 미치는 절삭조건, 피삭재와 공구의 재질 및 형상 등 절삭입력조건에 영향을 밝히는 것이다.

그러나 밀링절삭공정에서의 전단특성과 칩-공구 마찰특성에 대한 해석은 아직까지 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 단속절삭공정인 엔드밀공정에 상당하는 등가의 경사절삭을 설정하고 이에 의해 엔드밀링절삭공정의 전단특성 및 칩-공구 마찰특성의 해석을 시도하였다.

2. 절삭 모델

2.1 엔드밀링 절삭 모델

엔드밀링절삭에 상당하는 등가경사절삭 모델을 설정하기 위해서는 엔드밀링절삭공정의 기하학에 대한 이해가 필요하다.

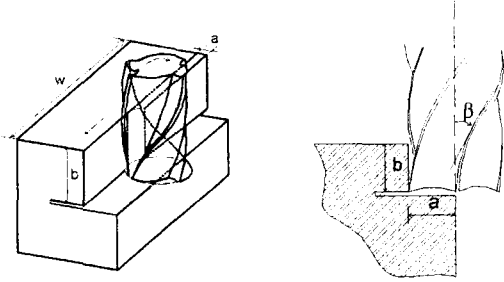


Fig. 1 Up end milling

Fig. 1은 상향 엔드밀링절삭시 공구와 피삭재의 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 그림에서와 같이 피삭재에 홈가공을 하여 밀날의 작용을 배제하였으며, 측면날의 작용만을 고려하였다. 이 경우 엔드밀은 축방향으로 b , 반경방향으로 a 의 절삭깊이를 가지며, 날이 축방향에 대하여 β 만큼의 나선각을 이루면서 폭 w 인 공작물을 가공한다.

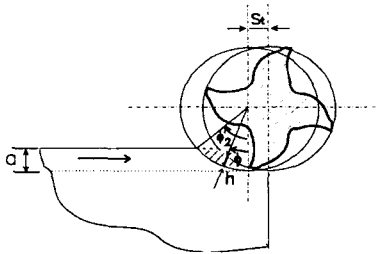


Fig. 2 Cutting model of up end milling

Fig. 2는 테이블이 이송하는 것을 대신하여, 공구가 날당 S_1 만큼 이송하면서 회전할 때의 공구와 피삭재사이의 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 h 는 공구경로 사이의 반경방향 길이의 차이로서 절삭공구의 반경방향 이송량을 나타내며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = S_1 \sin \phi \quad (1)$$

여기에서 ϕ 는 기준 위치로부터의 공구의 회전각이다. ϕ_2 는 날이 피삭재를 벗어날 때 공구의 회전각으로 식(2)에 의해 구해진다.

$$\cos \phi_2 = \frac{r-a}{r} \quad (2)$$

여기서 r 은 공구반경을 나타낸다.

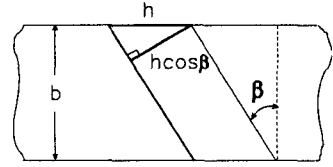
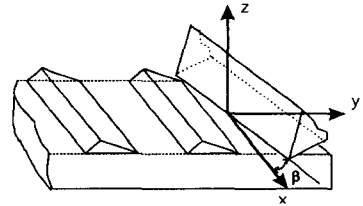


Fig. 3 Undeformed chip thickness

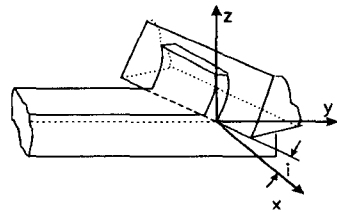
Fig. 3은 h 에 수직한 방향으로 보았을 때, 실제 길이로 나타나는 축방향 절삭깊이 b 와 나선각 β 가 이루고 있는 절삭날을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 절삭이 이루어지는 동안 미변형 칩의 두께는 날에 수직한 방향으로 고려해야 하므로 그림에 나타난 것처럼 $h \cos \beta$ 가 되며 이때 절삭 폭은 $b/\cos \beta$ 가 되어 나선각에 따라 영향을 받게 된다.

2.2 엔드밀링과 경사절삭의 비교

엔드밀링을 경사절삭에 대응시키기 위해서 엔드밀링과 경사절삭의 비교를 통해 엔드밀링의 가공조건을 경사절삭의 조건으로 동일화시키는 과정이 필요하다.



(a) End milling



(b) Oblique cutting

Fig. 4 Comparison of end milling and oblique cutting

Fig. 4(a)는 엔드밀가공 형상을 나타낸 것으로 미변형칩을 공구의 진행방향에 펼쳐놓았을 경우를 나타낸다. Fig. 4(b)는 3차원 경사절삭⁽⁴⁻⁶⁾을 나타내고 있다. 경사절삭은 공구날이 공구의 진행 방향과 수직인 x 축과 기울임각 (inclination angle), i 를 이루고 진행되는 절삭방식이다. Fig. 4(a)와 (b)를 비교

해보면 엔드밀링절삭시에도 날이 공구의 진행방향에 수직인 x축에 대해 나선각 β 만큼 기울어져 있으며 이것은 경사절삭에 있어 기울임각 i 에 해당한다.

그러나 엔드밀가공은 Fig. 4(a)에 나타난 것처럼 반경방향 절삭깊이 a 가 공구의 반경보다 작은 경우 한날이 가공을 마친후 다음 날이 가공을 시작하기 전까지 일정한 간격이 존재하므로 단속절삭이 이루어진다. 그러므로 엔드밀가공을 경사절삭에 대응시키기 위해서는 변화되는 절삭깊이와 절삭길이를 일정한 절삭깊이와 연속적인 절삭길이로 변환하는 것이 필요하다.

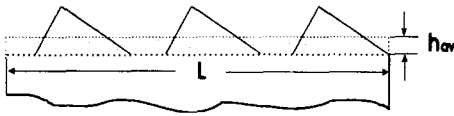


Fig. 5 Average chip side area

Fig. 5는 Fig. 4(a)에서 나타난 절삭가공될 부분을 공구가 진행하는 총길이까지 점선으로 표시되는 평균 절삭깊이로 변환한 것이다. 절삭이 일어나는 미변형칩들의 측면면과 등가인 면적을 총전개길이 L , 평균 절삭깊이 h_{av} 로 나타낸다. L 은 식(3)으로부터 구할 수 있으며, h_{av} 는 식(4)로부터 구할 수 있다.

$$L = 2\pi \frac{w}{S_i z} \quad (3)$$

$$h_{av} = \frac{a b w}{L b} = \frac{a w}{L} \quad (4)$$

L 과 h_{av} 가 결정되면, 엔드밀링절삭공정에 상당하는 일정한 절삭깊이로 연속절삭이 이루어지는 경사절삭으로의 해석이 가능하게 된다.

Table 1에는 엔드밀가공과 경사절삭의 가공조건이 주어져 있다. 경사절삭 모델은 Table 1에 제시된 입력항에 의해 칩 생성시 공구면상에 발생하는 마찰특성과 전단면상에서의 전단특성을 분리하여 해석할 수 있다.

이를 위해서는 주어진 엔드밀가공조건을 경사절삭의 가공조건들과 연관지어 생각할 필요가 있다. a 와 w 에 의해 결정된 평균 절삭깊이 h_{av} 는 경사절삭의 절삭깊이 t 에 해당되며, 축방향 절삭깊이와 절삭속도, 나선각은 각각 경사절삭에서의 절삭폭, 절삭속도, 기울임각과 같은 의미를 가진다.

그리고 엔드밀공구에서는 속도경사각 α_c 에 해당하는 각이 주어지며, 경사절삭에서는 수직경사각 α_n 이 공구형상에서 결정된다. 속도경사각과 수직경사각 사이에는 식(5)와 같은 관계가 성립한다.⁽⁷⁾

$$\tan \alpha_n = \cos i \tan \alpha_c \quad (5)$$

Table 1 Input items of cutting system

End milling	Oblique cutting
Radial depth of cut, a	Depth of cut, t Width of cut, b Cutting velocity, V Normal rake angle, α_n Inclination angle, i
Axial depth of cut, b	
Cutting length, w	
Cutting velocity, V	
Velocity rake angle, α_c	
Helix angle, β	
Number of tooth, z	
Feed per tooth, S_i	

2.3 경사절삭

경사절삭에서는 Table 1에 주어진 입력항과 가공에 소요되는 절삭력의 측정, 그리고 생성된 칩의 두께측정에 의해 공구면상의 마찰과 피삭재 전단면상의 특성을 나타내는 인자들을 구할 수 있다.

마찰면상의 특성을 나타내는 인자에는 마찰력 F_c , 공구 경사면에 작용하는 수직력 F_{cn} , 마찰계수 μ , 비마찰에너지 u_r , 전단특성을 나타내는 인자는 전단력 F_s , 전단면에 작용하는 수직력 F_{sn} , 전단변형률 γ , 전단응력 τ , 비전단에너지 u_s 등이 있다.

2.3.1 마찰 특성

식(6)과 식(7)로부터 공구경사면에 평행한 방향의 힘인 마찰력 F_c 와 수직인 방향의 힘인 수직력 F_c 을 구할 수 있다.

$$F_c = \{ (F_x \cos i + F_y \sin i)^2 + (F_x \sin \alpha_n \sin i - F_y \sin \alpha_n \cos i + F_z \cos \alpha_n)^2 \}^{1/2} \quad (6)$$

$$F_{cn} = -F_x \cos \alpha_n \sin i + F_y \cos \alpha_n \cos i + F_z \sin \alpha_n \quad (7)$$

이에 따라 칩과 공구경사면사이의 마찰계수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{F_c}{F_{cn}} \quad (8)$$

칩흐름방향과 공구면상의 힘 F_c 가 작용하는 방향이 이루는 각을 ρ_c 라 하면 칩흐름방향으로 작용하는 마찰력성분은 $F_c \cos \rho_c$ 가 된다. 따라서 비마찰에너지 u_r 는 식(9)와 같이 구할 수 있다. 여기서, V_c 는 칩의 마찰속도이다.

$$u_r = \frac{F_c \cos \rho_c V_c}{b t V} = \frac{F_c \cos \rho_c \cos i \sin \phi_n}{b t \cos \eta_c \cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (9)$$

2.3.2 전단 특성

전단면상에 평행한 힘인 전단력 F_s 와 수직인 힘인 수직력 F_{sn} 은 각각 식(10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_s = \left\{ (F_x \cos i + F_y \sin i)^2 + (-F_x \cos \phi_n \sin i + F_y \cos \phi_n \cos i + F_z \sin \phi_n)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$F_{sn} = -F_x \sin \phi_n \sin i + F_y \sin \phi_n \cos i - F_z \cos \phi_n \quad (11)$$

여기서 ϕ_n 은 수직전단각으로, 식(12)와 같이 나타낼 수 있으며, 전단변형률 γ 는 식(13)과 같이 주어진다.

$$\tan \phi_n = \frac{\frac{t}{t_c} \cos \alpha_n}{1 - \frac{t}{t_c} \sin \alpha_n} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{\cot \phi_n + \tan(\phi_n - \alpha_n)}{\cos \eta_s} \quad (13)$$

여기서 η_s 는 전단흐름각이며, 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \eta_s = \frac{\tan i \cos(\phi_n - \alpha_n) - \tan \eta_c \sin \phi_n}{\cos \alpha_n} \quad (14)$$

또한 여기에서 η_c 는 칩흐름각(chip flow angle)으로 본 논문에서는 Stabler의 칩흐름법칙⁽⁸⁾에 의해 기울임각 i 와 같다고 가정하였다. 그리고 전단면에 작용하는 전단응력 τ 는 식(15)에 의해, 수직응력 σ 는 식(16)에 의해 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{F_s}{bt} \sin \phi_n \cos i \cos \rho_s \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{F_{sn}}{bt} \sin \phi_n \cos i \quad (16)$$

전단방향과 전단면상의 힘 F_s 가 이루는 각이 ρ_s 일 때, 전단면상의 전단흐름방향으로 작용하는 전단력은 $F_s \cos \rho_s$ 이므로 비전단에너지 u_s 는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 V_s 는 전단속도이다.

$$u_s = \frac{F_s \cos \rho_s V_s}{btV} = \frac{F_s \cos \rho_s \cos i \cos \alpha_n}{bt \cos \eta_s \cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (17)$$

2.3.3 비절삭에너지

단위 체적당 작용하는 절삭에너지 즉, 비절삭에너지는 식(18)과 같이 비마찰에너지와 비전단에너지의 합으로 나타낼 수 있다.

$$u = u_f + u_s = \frac{F_y V}{btV} = \frac{F_y}{bt} \quad (18)$$

3. 절삭 실험

실험에 사용된 엔드밀은 TiAlN코팅이 된 초경공구로 직경이 8mm인 국내 T사의 UF10 HES4080T이다.

피삭재로는 기계구조용강 SM45C를 사용하였다.

절삭실험에는 최대회전수 6000rpm, 주축 동력이 20마력인 Yamage Techno사의 머시닝 센터를 사용하였다. 절삭실험조건은 Table 2에 나타낸 것과 같다.

Table 2 Cutting conditions

Radial depth of cut, a (mm)	1.5
Axial depth of cut, b (mm)	12
Cutting length, w (mm)	40
Cutting velocity, V (m/min)	90
Velocity rake angle, α_r (°)	8
Helix angle, β (°)	40
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, St (mm)	0.06

절삭력성분을 구하기 위해서 공구동력계(Kistler, 9273)에서 나오는 절삭력 신호를 다시 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 A/D 변환기(Data traslation, DT3831-G)로 보내어 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

또한 절삭실험시 얻어진 칩의 두께 측정을 위하여 공구현미경(Mitutoyo, TF-510FW)을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

절삭실험에서 얻어진 절삭 3분력의 평균값과 칩의 최대두께는 Table 3에 나타난 것과 같다.

Table 3 Measured items

Thrust force F_x (N)	Main cutting force, F_y (N)	Feed cutting force, F_z (N)	Maximum chip thickness t_c -max(mm)
59.783	220.202	36.019	0.127

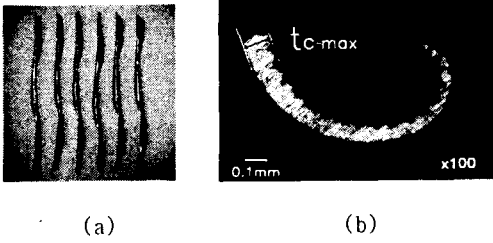


Fig. 6 Photographs of chip

Fig.6(a)는 생성된 칩이며, (b)는 생성된 칩의 단면을 나타낸 것이다. 칩단면에서 측정된 최대 칩 두께 t_{c-max} 로부터 평균 칩두께를 구할 수 있으며, 이는 h_{max} 와 h_{av} 의 관계와 일치한다. 이 관계에 의해 결정된 평균 칩두께 t_{av} 는 0.0388mm이었으며, 이 값과 절삭력을 이용하여 경사절삭에 관한 식(6)~(18)에 대입하면 Table 4에 나타낸 값들을 얻을 수 있다.

Table 4에 나타난 값들로 엔드밀링절삭시 칩-공구 경사면의 마찰특성 및 전단특성을 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 비절삭에너지 중에서 전단과정에 소모되는 에너지는 약 82% 이었고, 칩-공구 마찰과정에서는 약 18%가 소모되었다. 이와 같은 결과는 Merchant의 2차원 절삭⁽⁹⁾, Shaw 등의 경사절삭⁽⁵⁾ 및 외경선삭⁽¹⁰⁾ 실험에 대한 해석결과와 일치하는 경향을 나타낸다.

Table 4 Output items

Friction force, F_c (N)	111.93472
Normal force, F_{cn} (N)	202.06722
Coefficient of friction, μ	0.5243882
Specific friction energy, u_f (MPa)	227.36209
Shear force, F_s (N)	204.45057
Normal force to the shear plane, F_{sn} (N)	107.5198
Shear strain, γ	3.2426444
Shear stress, τ (MPa)	324.95834
Normal stress, σ (MPa)	170.9061
Specific shear energy, u_s (MPa)	1053.7244
Specific energy, u (MPa)	1281.0864

5. 결론

본 논문에서는 상향엔드밀링절삭에 해당하는 등

가의 경사절삭을 설정하였다. 이를 통해 상향 엔드 밀링절삭공정의 칩-공구 마찰 및 전단특성을 나타내는 인자를 구할 수 있었다. 절삭실험결과 절삭에너지 중에서 전단과정에 소모는 약 82% 이었고, 칩-공구 마찰과정에서는 약 18%가 소모되었다.

본 논문에서는 평균 절삭깊이와 절삭력을 이용하여 엔드밀링절삭과정을 해석하였지만, 절삭시 날의 위치 변화에 따른 절삭면적과 절삭력의 변화를 관련 지어 마찰, 전단특성을 해석하는 것이 앞으로 연구해야할 과제이다

참고문헌

1. Martellotti, M.E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol. 63, pp.677-700, 1941.
2. Tlusty, J., Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol.24, pp.21-25, 1975.
3. Zorev, N.N., "Interrelationship Between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting," Pro. Inter. Res. Prod. Conf., Carnegie Inst. of Tech., pp. 42-49, 1963.
4. Merchant, M.E., "Basic Mechanics of the Metal cutting process," J. of Applied Mechanics, Trans. of ASME, Vol. 66, pp.A-168-175, 1944.
5. Shaw, M.C., Cook, N.H., and Smith, P.A., "The Mechanics of Three dimensional Cutting Operation," Trans. of ASME, Vol. 74, pp.1055-1064, 1952.
6. Usui, E., "Analytical prediction of Three Dimensional Cutting Process," J. of Engineering for Industry, Trans. of ASME, Vol. 100, pp.222-228, 1978.
7. Shaw, M.C., "Metal Cutting Principles," Clarendon Press, Oxford, pp.428-438, 1984.
8. Stabler, G.V., "The Chip Flow Law and its Consequences," Pro. 5th. Int. Mach. Tool. Des. Res. Conf., Birmingham, pp. 243-251, 1964.
9. Merchant, M.E. "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip," J. of Applied Physics, Vol. 16, pp. 267-275, 1945.
10. 이영문, 최원식, 송태성, 박태준, 장은실, "3차원 절삭시 칩-공구 마찰 및 전단 특성 해석," 한국정밀공학회지 제 16권 제 6호, pp.190-196, 1999.