

## 밀링가공에서의 절삭력에 대한 해석적 연구

김국원\*(순천향대 기계공학과), 김남웅(LG전자 디지털미디어(연))

An Analytic Approach for Cutting Forces in Milling Process

K. W. Kim(Mech. Eng. Dept., SCHU), N. W. Kim(Digital Media Lab., LGE)

### ABSTRACT

This paper presents an effective cutting force model that enable us to predict the instantaneous cutting force in milling process from a knowledge of the work material properties and cutting conditions. The development of the model is based on the orthogonal machining theory with the effective rake angle which is defined in the plane containing the cutting velocity and chip flow vectors. Face milling tests are performed at different feeds and, a fairly good agreement is shown between the predicted cutting forces and test results.

**Key Words :** Orthogonal Machining Theory(2차원절삭이론), Effective Rake Angle(유효상면경사각), Milling Process(밀링가공), Cutting Force(절삭력)

### 1. 서론

절삭가공에 대한 실험적 또는 이론적 연구에 있어서 보통 공구날끌이 절삭속도에 수직인 2차원 절삭을 대상으로 하는데 이는 대부분의 절삭가공은 근사적으로 2차원절삭으로 표현할 수 있으며 이 경우 평면변형률 문제로 취급할 수 있기 때문이다. 이러한 2차원 절삭에 대해서는 1940년대 초 Merchant에 의해 제시된 전단면모델이 현재까지도 많이 이용되고 있으나 이 모델에서 필요한 전단각, 전단응력 및 마찰각 등은 주로 실험적 방법에 의해 구해지고 있다. 한편, 소성가공해석에 주로 사용되는 미끄럼선장법(slip line method)을 이용하여 절삭가공을 해석하려는 연구가 1960년대 이후 활발히 진행되었는데, 전단면을 중심으로 하는 제 1 소성역과 공구와 칩의 접촉부위에서 발생하는 제 2 소성역의 응력상태를 피삭재의 가공경화 및 온도상승까지 고려하여 해석하는 등 많은 이론적 진전이 있었다. Oxley<sup>(1)</sup>는 미끄럼선장법을 기초로 하여 피삭재의 유동응력을 포함하는 물성치와 절삭조건만으로 전단각, 전단응력 및 마찰각 등을 예측하고 이로부터 절삭력과 절삭온도를 계산하였다. 이 이론은 실험치와 매우 잘 일치하였으며, 전단면 모델에 비해 보다 많은 정보를 얻을 수 있었다.

현재까지 대부분의 절삭이론은 2차원 정상상태

에서 절삭속도와 미변형 칩두께가 일정한 경우에 한정되었다. 최근 Young 등<sup>(2)</sup>은 Oxley의 2차원 칩형성이론을 사용하여 절삭조건이 계속 변하는 밀링가공의 절삭력을 예측하였다. 그러나 Young 등의 연구내용은 밀링공구의 축방향 경사각, 반경방향 경사각이 모두 0인 경우에만 유효한 것으로 다시 말하면 절삭 순간 2차원 절삭이 이루어지는 경우에 한정되었다.

본 연구에서는 Oxley의 2차원 절삭이론을 사용하여 축방향경사각, 반경방향경사각이 존재하는 밀링공정에 대해 절삭력을 예측하는 방법을 제시한다. 본 방법은 어떠한 절삭실험 없이 피삭재의 물성치와 절삭조건만으로 절삭력을 예측할 수 있으며, 공구형상의 미소한 변화에 따른 절삭력 변화를 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다. Oxley의 2차원 절삭이론에 대해서는 참고문헌 (1)을 참조하기 바란다.

### 2. 3차원 절삭력 예측

절삭가공에 대한 수많은 연구들이 대부분 2차원 절삭을 대상으로 하지만 실제 가공에서는 기울임각,  $i$  가 존재하는 3차원 절삭인 경우가 대부분이다. 이러한 3차원절삭에 있어서 가장 중요한 문제중의 하나는 칩유출방향의 결정이며 또한 유효상면경사각과 수직상면경사각중 어느 것이 실제 가공에서 중요한 역할을 하느냐에 대한 논란이다. 유효상면경사각은

절삭속도와 침속도 벡터를 포함하는 평면에서 공구 상면과 절삭속도사이의 각을 말하며, 수직상면경사각은 공구끝단에 수직인 평면에서 공구상면과 절삭 속도사이의 각을 일컫는다(Fig. 1 참조).

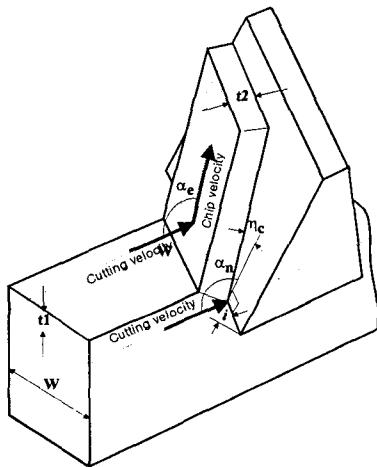


Fig. 1 Oblique machining

본 연구에서는 Usui 등<sup>(3)</sup>의 연구에서처럼 유효상면경사각의 개념을 이용한다. 유효상면경사각을 포함하는 평면에서 2차원 절삭력이 앞 절의 절삭이론에 따라 결정되면 회전행렬변환법<sup>(4)</sup>에 의해 3차원 절삭력으로 변환되고 최종적으로 정면밀링의 절삭력으로 계산된다. 이 절에서는 유효상면경사각을 이용하여 3차원 절삭력으로 변환되는 방법을 간단히 설명한다.

Fig. 2는 정면밀링커터의 한 절삭날을 노우즈가 존재하지 않는 경우에 대해 도시한 그림이다. 그림에서 z 방향은 절입깊이 방향이며, y 방향은 접선력의 작용방향, -x 방향은 침두께의 방향이다. 면 ACH는 절삭날의 상면을 나타낸다.  $\alpha_a$ 는 어프로우치각,  $\alpha_r$ 는 반경방향경사각,  $\alpha_x$ 는 축방향경사각이며, i는 기울임각이다. AS는 공구상면에서의 침 유출 방향을 나타낸다. AS를 지나는 공구상면에 수직으로 자른 단면을 Fig. 3과 같이 도시하면  $\alpha_e$ 는 유효상면 경사각이며 다음과 같이 계산된다.

$$\sin \alpha_e = \sin \eta_c \sin i + \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n \quad (1)$$

여기서 침유출각  $\eta_c$ 는 Stabler(5)의 가정( $\eta_c = i$ )을 따른다. 수직경사각 역시 공구의 기하학적 형상관계로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\tan \alpha_n = \cos i (\tan \alpha_r \cos \alpha_n + \tan \alpha_x \sin \alpha_n) \quad (2)$$

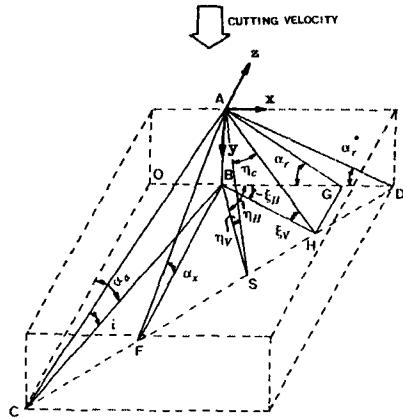


Fig. 2 Geometrical representation of cutter edge

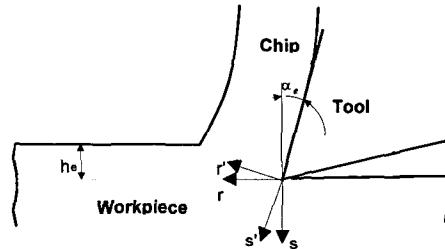


Fig. 3 Cross section of cutting tool in the plane containing the cutting velocity and chip velocity

이 때 r-s좌표계와 r'-s'좌표계는 유효경사각 만큼의 좌표회전에 의해 동일하게 되므로,  $F_r'$ ,  $F_s'$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} F_r' \\ F_s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_e & -\sin \alpha_e \\ \sin \alpha_e & \cos \alpha_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $F_r$ ,  $F_s$ 는 Oxley의 2차원 절삭이론으로부터 구해진다.  $F_r'$ ,  $F_s'$ 를 xyz 좌표계의 성분으로 분해하면

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} F_r' \\ F_s' \end{bmatrix} \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있으며 여기서 변환행렬  $[T]$ 는 어프로우치각, 반경방향경사각 및 축방향경사각을 포함하는 공구의 기하학적 형상과 침유출각의 가정으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} (\sin \alpha^*, \cos \alpha_x)/N & -\cos \eta_V \cos \eta_H \\ (-\cos \alpha^*, \cos \alpha_x)/N & -\sin \eta_V \sin \eta_H \\ (-\sin \alpha^*, \sin \alpha_x)/N & -\cos \eta_V \sin \eta_H \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$N = \sqrt{\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha^* \sin^2 \alpha_x}$$

### 3. 밀링가공해석

밀링가공에서는 절삭과정 중에 커터의 회전과 이송이 동시에 이루어져 절삭면적, 즉 미변형 칩두께가 연속적으로 변하게 된다. 실제 가공은 회전하는 밀링커터와, 공구대에 의해 이송되는 피삭재에 의해 이루어지나 상대운동의 관점에서 피삭재는 고정되고 밀링커터가 회전과 이송을 동시에 한다고 가정하는 것이다. Fig. 4는 밀링가공을 나타내고 있다.

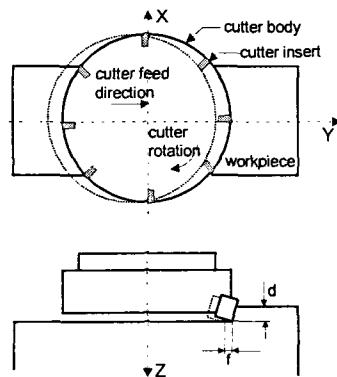


Fig. 4 Face milling cutter and geometry

$f_n$ 은 공구대의 이송률(mm/rev),  $V$ 는 밀링커터의 회전속도(rpm),  $f_t$ 는 밀링커터 1회전당 이송량을 나타내며  $f_t/V$ 으로 계산된다.  $R$ 은 밀링커터의 반경(mm),  $d$ 는 절입깊이(mm)를 나타낸다.

커터의 궤적을 고려한 미변형 칩두께는 다음 식으로 표시된다.

$$t_l(\theta) = R + f_t \sin \theta - (R^2 - f_t^2 \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (6)$$

$$\approx f_t \sin \theta$$

어프로우치각에 의해 미변형 칩두께와 절삭너비는 다음과 같이 계산된다.

$$t_l = f_t \sin \theta \cos \alpha_a \quad (7)$$

$$w = d / \cos \alpha_a$$

식(4)는 국부 xyz 좌표계로서 XYZ 전체좌표계로의 변환을 위해 고쳐쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 4. 실험 및 계산치와의 비교

앞절에서 언급한 이론적 내용의 유용성을 확인하기 위하여 밀링 절삭력 측정 실험을 수행하였다. 사용된 피삭재는 0.2 % 탄소강이며 사용된 실험장치는 Table 1과 같다.

Table 1 Experiment apparatuses

Milling machine	HITACHI numerical control milling machine (VA-40)
Dynamometer	KIESTLER AST 1207 (밀링용, strain gauge type)
Amplifier	KYOWA DPM-310B (strain gauge type)
Oscilloscope	T912 (TEKTRONIX)
A/D converter	Lab-master
Datacorder	KYOWA RTP-501AL (max. freq. 2.5kHz)
Computer	IBM-PC

실험과 해석은 1날 절삭에 대해 이루어졌다. 사용된 Cutter body의 지름은 100 mm이며, 어프로우치각 15°, 반경방향경사각 0°, 축방향경사각 7°의 절삭날을 가진다. 회전속도 320rpm, 절입깊이 2mm이며, 이송은 48mm/min과 64mm/min 두가지 경우에 대하여 실험이 수행되었다. Table 2는 절삭조건을 나타내고 있다. 밀링용 공구 동력계에서 측정된 절삭력은 스트레인게이지 타입 앰프를 통하여 증폭되고 앰프 내부의 로우패스 필터를 통하여 된다. 이 신호를 데이타코더를 통해 저장하였다가 다시 아날로그/디지털 변환기를 거쳐 컴퓨터에서 처리한다.

Table 2 Cutting conditions

Cutter body	V (rpm)	d (mm)	f (mm/min)	CASE
지름 100mm			48	1
어프로우치각 15°	320	2		
축방향경사각 7°			64	2
반경방향경사각 0°				

Fig. 5는 CASE1에 대한 실험 및 해석 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 점선은 실험으로 측정된 값이며 실선은 절삭이론으로 예측되는 값이다.  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ 는 각각 주분력, 이송분력, 배분력을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 예측되는 절

삭력의 파형과 그 값은 3방향의 절삭분력 모두 실험 결과와 매우 잘 일치한다.

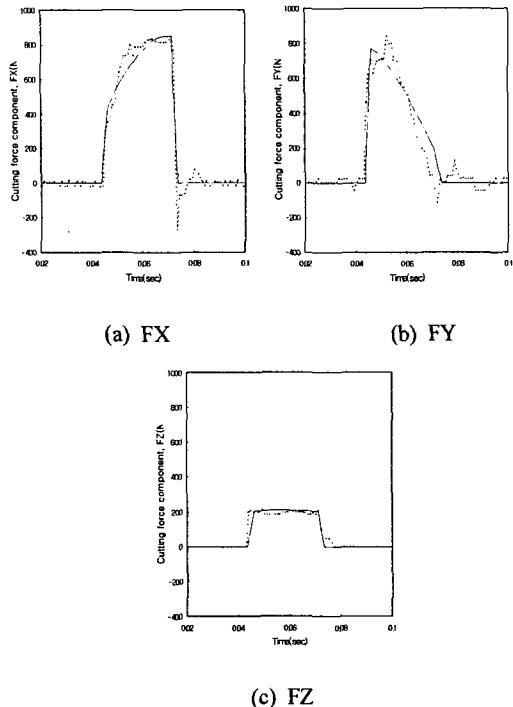
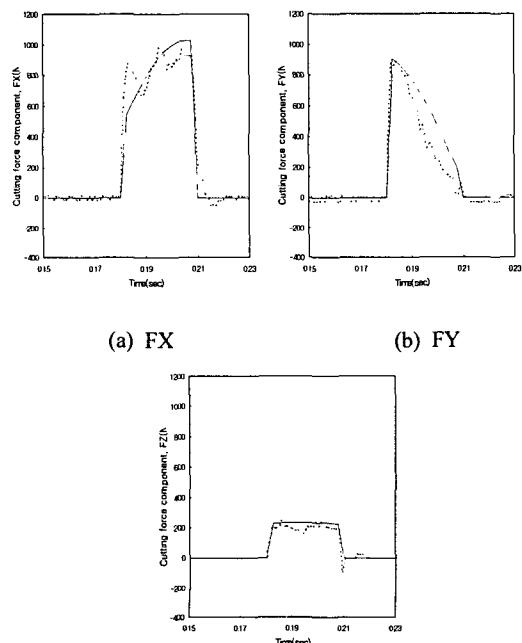


Fig. 5 Predicted and experimental cutting forces for case1



(c) FZ  
Fig. 6 Predicted and experimental cutting forces for case2

Fig. 6은 CASE2에 대한 실험 및 해석 결과를 나타낸다. CASE1에 비해 이송이 1.33배 증가한 경우로써 Fig. 5에 비해 주분력, 이송분력이 증가하였음을 알 수 있다. 배분력의 경우 큰 차이를 보이지 않는다. 절삭이론으로 예측되는 값은 Fig. 5와 마찬가지로 주분력, 이송분력, 배분력 모두 절삭력 크기와 파형에 있어서 매우 잘 일치하였다. 이상의 결과로써 Oxley의 2차원 절삭이론과 유효상면경사각을 이용하여 절삭조건이 연속적으로 변하는 밀링공정을 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 절삭조건이 연속적으로 변하는 밀링가공에 대하여 효과적으로 절삭력을 예측하는 방법을 제시하였다. 이 방법에 따르면 어떠한 절삭 실현 없이 괴사재의 물성치와 절삭조건만으로 절삭력의 크기 뿐 아니라 절삭파형의 미세한 부분까지 예측할 수 있다. 해석의 검증을 위하여 정면밀링 절삭력 측정 실험을 수행하였으며, 실험결과와 예측결과는 3방향의 절삭분력이 모두 잘 일치하는 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 제시하는 방법은 절삭 전 공구가 받는 힘을 예측할 수 있으므로, 가공 공정 설계 및 밀링 공구설계에 효과적으로 이용될 수 있다.

## 참고문헌

1. Oxley, P.L.B., 1989, Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood, Chichester.
2. Young, H.-T., Mathew, P. and Oxley, P.L.B., 1994, "Predicting Cutting Forces in Face Milling", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No., 6, pp. 771 ~ 783.
3. Usui, E., 1978, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process", Trans. ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 100, pp. 229 ~ 235.
4. 이우영, 신효철, 1989, 전단유동응력에 의한 정면 밀링의 절삭력 해석, 대한기계학회 논문집, 제13 권, 제6호, pp. 1170 ~ 1182.
5. Stabler, G.V., 1951, "Geometry of Cutting Tools", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, Vol. 165, pp. 14 ~ 26.