

Z-map과 절삭계수를 이용한 볼엔드밀의 평균절삭력 예측

Prediction of Mean Cutting Force in Ball-end Milling using Z-map and Cutting Parameter

황 인길(서울대 대학원), 김 규만(서울대 대학원), 주 중남(서울대 기계설계학과)

ABSTRACT

A new cutting parameter is defined in the spherical part of ball end-mill cutter. A series of slot cutting experiments were carried out to obtain the cutting parameter. The cutter contact area is expressed as the grid position in the cutter plane using Z map. The cutting forces in each grid are calculated and saved as force map, prior to the average cutting forces calculation. The cutting force, in the arbitrary cutting area, can be easily calculated by summing up the cutting forces of the engaged grid in the force map. This model was verified in the inclined surface cutting by cutting test of a cylindrical part.

Key Words : Average cutting force, Z map, Cutter plane, Inclined surface cutting

Nomenclature

P_T, P_R	cutting parameter
b	width of cut
t	undeformed chip thickness
r	radius to mapped point
m_T, m_R	model parameter characterizing the size effect of the workpiece material
θ	axial rotation angle of tool
f	feed per tooth
dF_T	tangential force of finite cutting edge
dF_R	radial force of finite cutting edge
a_i, b_i	coefficients of $P_T(r), P_R(r)$
$\overline{F_x}$	average x-directional cutting force
$\overline{F_y}$	average y-directional cutting force
$\widehat{F_x}$	x-directional force of grid element
$\widehat{F_y}$	y-directional cutting force of grid

1. 서론

볼엔드밀 가공은 곡면을 가공할 때 가공표면에 대한 공구 위치의 결정 방법이 비교적 간단하여 NC 프로그램이 용이하며, 표면의 곡률이 급격하게 변하는 경우에도 가공이 가능하다. 이러한 이유로 볼엔드밀 가공은 여러 가지 형상의 자유곡면의 정삭 가공에 주로 사용되고 있는 실정이며, 이에 대한 절삭 특성 연구에 대한 필요성이 점차로 증가하게 되었다. 절삭가공 특성에 있어서 가장 중요한 요소 중 하나로 절삭력을 들 수 있다. 절삭력은 공작기계 과부하 예측, 공구 변형, 공구 파괴, 공구 마모 해석, 채터 해석 등의 기초 도구로 사용될 수 있으며 공정 설계와 모의 가공을 통한 최적 가공 조건 산출의 자료로 사용이 가능하다.

최근 들어 볼엔드밀 절삭력 해석에 대한 연구는 증가하는 추세이나, 이전의 엔드밀 가공의 절삭력 해석은 비교적 절삭기구가 간단한 평엔드밀 가공의 연구에서 시작되었다. DeVor는 공구날을 따라서 여러개의 미소절삭날로 나누고 이들 미소절삭날에서의 미소절삭력을 비절삭 저항을 이용하여 계산하는 방법을 제시하였다⁽¹⁾. 그러나 이 모델에서의 비절삭 저항은 모든 미소절삭날의 위치와 무관하기 때문에 절삭날의 형상이 공구 끝단에서 연속적으로 변하는 볼엔드밀에는 적용될 수 없었다. 양민양 등은 절삭

속도와 칩유출속도로 이루어지는 평면 내에서 2차원 절삭이론을 적용하여 3차원 절삭으로 확장하는 방법을 제시하였다⁽²⁾. Tai 등은 공구날 형상을 해석하고 3차원 절삭이론(oblique cutting model)을 도입하여 각각의 미소절삭날에서의 절삭력을 계산하였다⁽³⁾. Feng 등은 실험적인 절삭계수를 미소절삭날(finite chip load element)의 위치함수로 가정하는 방법을 제시하였다⁽⁴⁾. 김규만 등은 Z-map에서 구하여진 절삭영역에서 임의의 공구위치에서 절삭력을 구하는 방법을 제시하였다⁽⁵⁾.

이들이 제시한 절삭력 모델은 어느 정도의 정확성을 보이고 있으나 모두 공구의 회전각도에 따른 모든 절삭력의 계산에 초점을 두고 있으므로 계산 알고리즘이 복잡하고 이에 따른 계산 시간이 오래걸리는 단점이 있다. 실제 현장에서 가공되는 가공물은 형상의 복잡함에 따라 매우 많은 공구 위치 데이터가 필요하기 때문에 보다 빠른 절삭력 계산 모델이 필요하다. 계산 시간을 단축하기 위하여는 모든 공구회전각도에서 절삭력보다는 한 회전당 평균절삭력을 구하는 것이 유리하다.

본 연구에서는 볼엔드밀 선단 반구 부분에서 공구날 위치에 따른 평균절삭력 기구를 해석하고 평균절삭력 계수 함수를 모델구축 실험을 통하여 구하였다. 구하여진 계수는 공구의 수직면에서 XY위치에 따라 미리 계산하여 XY-map에 저장한 후, 주어진 가공위치에서 평균절삭력은, Z-map으로 부터 구하여진 절삭영역에 포함되는 계수들을 XY-map에서 불러들여 합산함으로써, 빠르게 계산할 수 있었다. 또한, 수평면 가공 및 실린더 측벽가공 실험을 수행하여 반경방향 절삭 깊이와 가공면 기울기각에 따른 모델의 절삭력 예측 성능을 검증하였다.

2. 절삭력 모델

공작물의 제거시 절삭력은 제거되는 단면적에 비례하게 되며, 관계된 미변형 칩 두께(involved undeformed chip thickness)가 작은 경우의 밀링과정(end milling process)에서는 치수 효과(size effect)를 고려하여, 절삭력은 식(1)과 같이 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

$$F = Pbt^m \quad (1)$$

Martellotti가 제안한 방법에 따르면, 공구의 회전 속도에 비하여 단위 회전당 이송량이 매우 작은 경우에는 미변형 칩 두께는 식(2)와 같으므로, 하나의 미소 절삭날이 겪는 접선방향, 반경방향 절삭력은

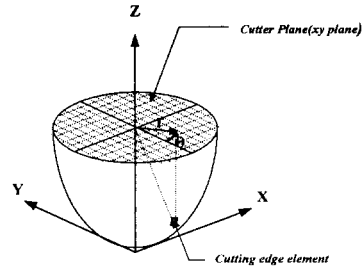


Fig. 1 Coordinate System used in the model

식(3),(4)와 같다.

$$t(\theta) = f \sin \theta \quad (2)$$

$$dF_T(\theta) = P_T(r) dr (f \sin \theta)^{m_T} \quad (3)$$

$$dF_R(\theta) = P_R(r) dr (f \sin \theta)^{m_R} \quad (4)$$

볼엔드밀 선단의 반구 부분에서 미소 절삭날은 그 위치에 따라, 각기 다른 고유의 절삭기구를 가지게 된다. 따라서, 본 논문에서는 절삭계수 P_T , P_R 를 미소 절삭날을 공구에 수직면인 XY평면(공구평면)⁽⁵⁾의 중심으로부터 전사위치까지의 반경거리 r 에 대한 3차식으로 근사화하여

$$P_T(r) = a_0 + a_1\left(\frac{r}{R}\right) + a_2\left(\frac{r}{R}\right)^2 + a_3\left(\frac{r}{R}\right)^3 \quad (5) \\ (0 < r < R)$$

$$P_R(r) = b_0 + b_1\left(\frac{r}{R}\right) + b_2\left(\frac{r}{R}\right)^2 + b_3\left(\frac{r}{R}\right)^3 \quad (6) \\ (0 < r < R)$$

로 가정하고 미소 절삭날의 위치에 따른 절삭기구의 변화를 절삭계수로 설명하고자 한다.

또한, 접선방향 및 반경방향 절삭력은 회전변환을 통하여 X,Y방향의 절삭력으로 변환한다.

$$dF_x(\theta) = -dF_T \sin \theta - dF_R \cos \theta \quad (7)$$

$$dF_y(\theta) = dF_T \cos \theta - dF_R \sin \theta \quad (8)$$

따라서, 위 식(7), 식(8)을 반경방향의 접촉면적과 모든 공구 회전각에 대하여 적분을 한 후 이를 평균함으로써 한 회전당의 평균 절삭력을 구하면 다음과 같은 식이 된다

$$\bar{F}_x = \frac{1}{2\pi} \int_r \int_\theta (-P_T(r)(f \sin \theta)^{m_T} \sin \theta - P_R(r)(f \sin \theta)^{m_R} \cos \theta) d\theta dr \quad (9)$$

$$\overline{F}_y = \frac{1}{2\pi} \int_r \int_\theta (P_T(r)(f \sin \theta)^{m_T} \cos \theta - P_R(r)(f \sin \theta)^{m_R} \sin \theta) d\theta dr \quad (10)$$

슬롯커팅의 경우 θ 가 0에서 π 까지 변화하므로, 위 식(9), 식(10)은 다음과 같이 간략화된다

$$\overline{F}_x = \frac{1}{2\pi} \int_r \int_\theta -P_T(r)(f \sin \theta)^{m_T} \sin \theta d\theta dr \quad (11)$$

$$= rAa_0 + \frac{r^2A}{2R} a_1 + \frac{r^3A}{3R^2} a_2 + \frac{r^4A}{4R^3} a_3$$

$$A \equiv -\frac{1}{2\pi} f^{m_T} \int_0^\pi \sin^{1+m_T} \theta d\theta$$

$$\overline{F}_y = \frac{1}{2\pi} \int_r \int_\theta -P_R(r)(f \sin \theta)^{m_R} \sin \theta d\theta dr \quad (12)$$

$$= rBb_0 + \frac{r^2B}{2R} b_1 + \frac{r^3B}{3R^2} b_2 + \frac{r^4B}{4R^3} b_3$$

$$B \equiv -\frac{1}{2\pi} f^{m_R} \int_0^\pi \sin^{1+m_R} \theta d\theta$$

그러므로, 슬롯커팅 실험을 통하여 평균 절삭력 $\overline{F}_x, \overline{F}_y$ 를 구하면 실험적 절삭계수 P_T, P_R 의 계수 a_i, b_i ($i=0, 1, 2, 3$)를 결정할 수 있다.

3. 맵핑(mapping)기법을 사용한 평균절삭력 해석

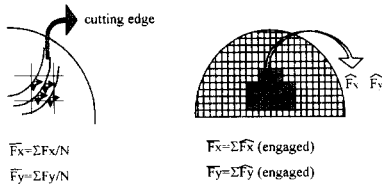


Fig. 2 Engaged Grid Cutting Force in the Force Map

본 연구에서는 절삭력 해석 속도를 향상시키기 위하여 Z-map방법과 맵핑기법을 사용하였다. 가공중 공구의 절삭영역은 Z-map을 이용하여 공구에 수직인 공구평면에 XY 그리드로 표현될 수 있다. 공구평면상의 임의의 그리드에 전사되는 미소 절삭날에서의 미소 절삭력은 앞에서 보인 식(3),(4)와 같으며 이는 식(7),(8)에 의하여 XY방향 절삭력 성분으로 변환이 가능하다. 공구의 임의 회전각에서의 절삭력은 절삭영역에 있는 모든 미소절삭날에서의 절삭력은 합산하면 계산이 가능하다. 만약 평균절삭력을 구할 때에는 모든 공구회전각에서의 절삭력을 합산하여야 하므로, Fig. 2에서 보인 것과 같이,

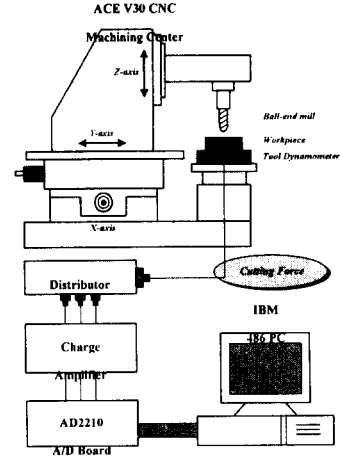


Fig. 3 Experimental Setup

이는 주어진 절삭영역에서 모든 미소절삭력을 합하는 경우와 같다.

따라서, 한 그리드 내에서의 절삭력 계수는 같다는 가정을 한다면, 평균 절삭력은 절삭영역에 포함되는 그리드 들에서의 절삭력을 합함으로써 계산될 수 있다. 공구평면상의 (x,y) 위치에 있는 그리드에서의 절삭력은, 위치좌표값 x,y 를 r, θ 좌표계의 좌표값 r, θ 으로 변환하면, 다음과 같이 계산된다.

$$\widehat{F}_x(x, y) = [-P_T(r)(f \sin \theta)^{m_T} \sin \theta - P_R(r)(f \sin \theta)^{m_R} \cos \theta] \Delta x \Delta y \quad (13)$$

$$\widehat{F}_y(x, y) = [P_T(r)(f \sin \theta)^{m_T} \cos \theta - P_R(r)(f \sin \theta)^{m_R} \sin \theta] \Delta x \Delta y \quad (14)$$

절삭력 계산에 앞서 공구평면상의 모든 그리드에서 $\widehat{F}_x(x, y), \widehat{F}_y(x, y)$ 를 먼저 계산하고 이를 XY-map에 저장하면, 주어진 절삭영역에 포함되는 그리드에서의 절삭력을 읽어들이어 단순히 합산함으로써, 평균절삭력을 쉽고 빠르게 구할 수 있다.

$$\overline{F}_x = \sum_x \sum_y \widehat{F}_x(x, y) \delta \quad (15)$$

$$\overline{F}_y = \sum_x \sum_y \widehat{F}_y(x, y) \delta \quad (16)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{(if engaged)} \\ 0 & \text{(if not engaged)} \end{cases}$$

4. 실험 및 결과분석

기계는 대우 중공업에서 제작한 vertical CNC machining center ACE-V30 을 사용하였다. 공구는

직경 12mm의 초경 두날 불엔드밀을 사용하였으며 헬릭스각은 30°이다. 공작물의 재질은 제품의 개발시 급형의 테스트용으로 많이 쓰이는 아연합금(ZAS)을 이용하였다.

절삭력은 Kistler사의 공구동력계 9257B를 사용하였으며, 전하증폭기(charge amplifier)를 통하여 컴퓨터에서 1000Hz로 이산화하여 절삭력을 저장하였다. 증폭기에서 low pass filter로는 300Hz를 사용하였고 시정수(TC)는 long으로 지정하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 3에 나타내었다.

4.1 슬롯커팅(slot cutting)을 통한 절삭력 모델 형성

절삭력과 절삭폭,미변형 칩두께의 관계를 설명하기 위한 절삭계수(cutting mechanics parameter)를 구하기 위하여 다양한 반경방향의 절삭깊이를 가지는 슬롯커팅을 행하였다. 자세한 실험조건은 아래 Table. 1에 나타내었다.

이 슬롯커팅 테스트에서 구한 평균절삭력을 이용하여 위 식 (11),(12)에서 절삭계수 P_T, P_R 의 계수 a_i, b_i ($i=0, 1, 2, 3$)와 재료상수 m_T, m_R 를 최소오차 차승법을 통하여 결정한 결과는 다음과 같다.

$$P_T = 353.9 - 2579.9 \left(\frac{r}{6}\right)^2 + 5790.9 \left(\frac{r}{6}\right)^3 \quad (17)$$

$$P_R = 62.17 - 1072.9 \left(\frac{r}{6}\right)^2 + 2091.4 \left(\frac{r}{6}\right)^3 \quad (18)$$

$$m_T = 0.7053, m_R = 0.4788 \quad (19)$$

축방향 절삭깊이 (mm)	반경방향 절삭깊이 (mm)	이송량(mm/tooth)
0.3	1.8735	0.021 0.030 0.045 0.050 0.060 0.075
0.6	2.6153	0.021 0.030 0.045 0.050 0.060 0.075
1.0	3.3166	0.021 0.030 0.045 0.050 0.060 0.075
2.0	4.4721	0.010 0.020 0.045 0.060 0.075
3.0	5.1961	0.0283 0.0425 0.075
4.0	5.6568	0.020 0.045
5.0	5.9161	0.020 0.040 0.060
6.0	6.0000	0.0117 0.020 0.030 0.040

Table. 1 Test Cutting Conditions of Slot Cutting

주어진 실험에서 Z-map방법으로부터 구해진 절삭영역과, 결정된 절삭계수를 이용하여 예측된 평균 절삭력과 실제 실험치를 비교하면 다음 Fig. 4와 같다. 예측된 절삭력은 실제 절삭력과 10%이내의 오차를 보이고 있다.

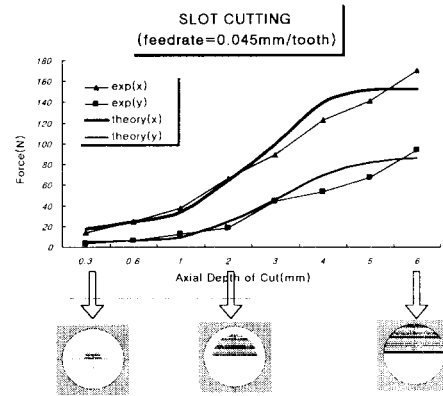


Fig. 4 Test Results in Slot Cutting

4.2 평면 가공에서의 절삭력 예측 모델의 검증

본 논문에서 개발된 절삭계수 P_T, P_R 의 성능을 평가하기 위하여 일정한 축방향 절삭깊이에서 반경방향 절삭깊이를 변화시켜 가면서 절삭 실험을 수행하였다. 자세한 실험조건은 아래 Table. 2에 나타내었다. 이 경우 Fig. 5에 나타난 바와 같이 실제 실험치와 예측된 절삭력이 근접함을 알 수 있다.

축방향 절삭깊이 (mm)	반경방향 절삭깊이 (mm)	이송량(mm/tooth)
6.0	6.0	0.057143
6.0	6.0	0.042857
6.0	4.0	0.057143
6.0	4.0	0.042857
6.0	4.0	0.028571
6.0	3.0	0.057143
6.0	3.0	0.042857
6.0	3.0	0.028571

Table. 2 Cutting Conditions of Model Verification Tests

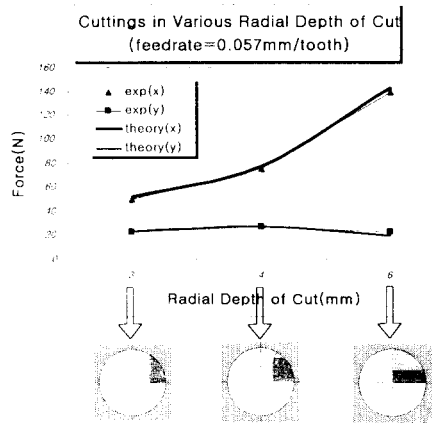


Fig. 5 Results of Model Verification Tests

4.3 3차원 측벽가공으로의 적용

실린더 형상을 가진 공작물의 3차원 가공을 통하여 다양한 측벽각도에서의 절삭력 예측 성능을 검증하였다. Fig. 6과 같이 공구에 대한 가공면의 위치에 따라 zone1, zone2로 나누어 각각의 가공면 측벽각도에 따라서 실제절삭력과 예측된 절삭력을 비교하였다. 가공물의 모델링을 위해서 (주)Cubic Tec.의 OMEGA를 사용하였으며, 이로부터 구해진 절삭영역데이터에서 절삭력을 예측하였다. 절삭깊이를 1.5mm로 유지하기 위하여 황삭 및 중삭가공으로 가공물의 전가공을 수행하였다. 공구경로간 간격은 1.5mm이다. Table. 3에 이 실험에서 사용된 실험조건을 나타내었다.

절삭깊이	1.5mm
경로간격	1.5mm
이송량	0.0833, 0.167mm/tooth

Table. 3 Cutting Conditions of Inclined surface Cutting Tests

Fig.7과 Fig.8에서는 본 논문에서 제시한 방법으로 예측된 공구 회전당 평균절삭력과 실제 평균절삭력을 비교한 것이며 각 경우에 있어서 공구평면에서의 절삭영역을 보이고 있다. 모든 공구면 기울기 각도의 측벽가공에서 정확한 절삭력 예측이 가능함을 보이고 있다. 따라서 임의의 형상을 지닌 3차원 곡면의 윤곽가공(contouring cutting)에서의 절삭력예측

모듈로 적용이 가능함을 알 수 있다.

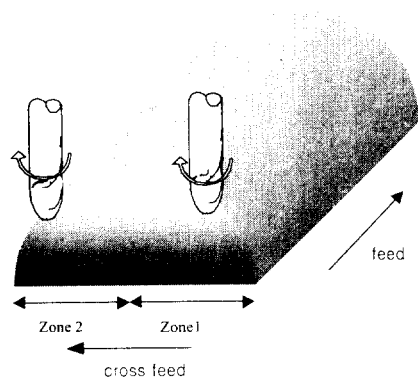


Fig. 6 Geometry of Inclined Surface Cutting Tests

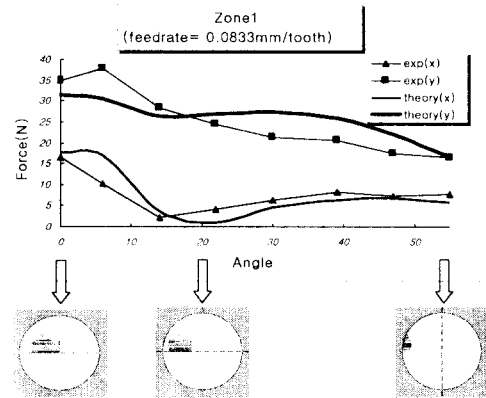


Fig. 7 Results of Inclined Surface Cutting Tests (Zone 1)

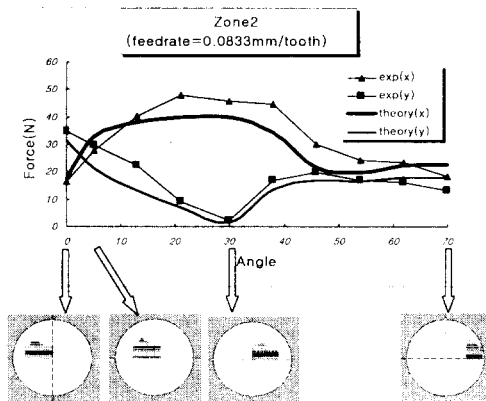


Fig. 8 Results of Inclined Surface Cutting Tests (Zone 2)

5. 결론

기존의 복잡한 공구기하를 통한 절삭력 예측방법에서 벗어나 Z-map을 이용한 임의의 절삭영역의 맵핑 기법과 절삭계수를 이용하여 좀 더 빠른 시간내에 볼엔드밀의 평균 절삭력을 예측하는 절삭력 예측 모델을 구축하였다. 슬롯커팅을 통하여 예측 모델을 구축한 후, 일정한 축방향 절삭깊이에서 반경방향의 절삭깊이를 변화시키는 실험을 통하여 예측 모델의 타당성을 검토하였다. 또한, 실린더 형상의 공작물 가공을 수행하여 측벽가공에서도 정확한 절삭력 예측이 가능함을 확인함으로써, 3차원 곡면의 가공 시 절삭력 예측 모듈로 적용이 가능함을 검증하였다.

Reference

1. W.A. Kline, R.E. DeVor, "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts," *Int.J.Mach.Tool Des.Res.*, Vol.22, No.1, pp 7-22, 1982
2. M.Y. Yang, H.D. Park, "The prediction of cutting force in ball-end milling," *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.31, No.1, pp 45-54, 1991
3. C.C. Tai, K.H. Fhu, "Model for cutting forces prediction in ball-end milling," *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.35, No.4, pp 511-534, 1995
4. H.Y. Feng, C.H. Menq, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process- I. Model formulation and model building procedure," *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.34, No.5, pp 697-710, 1994
5. 김규만, 조필주, 김병희, 주종남, "Z-map을 이용한 임의의 절삭영역에서 볼엔드밀의 절삭력 예측," *한국정밀공학회지*, 제14권, 제3호, pp 57-65, 1997