

STD11의 볼엔드밀링 공정에서의 절삭력 해석

Cutting force analysis in ball-end milling processes of STD11

김남규* (한양대학교 대학원), 정성중 (한양대학교 기계공학부)
N.K.Kim* (Hanyang Univ. Graduate School), S.C.Chung (Hanyang Univ.)

Abstract

STD11 is one of difficult-to-cut materials and its cutting characteristic data is not built enough. A bad cutting condition of it leads to low productivity of die and mould, so it is necessary to evaluate the machining characteristics of STD11. In this paper, the relations of the geometry of ball-end mill and mechanics of machining with it are studied. The helix angle of ball-end mill varies according to a location of elemental cutting edge in the axial direction. Therefore the chip load areas in cutting process are difficult to calculate accurately. To calculate instantaneous cutting forces, it is supposed that the tangential, radial and axial cutting force coefficients are functions of elemental cutting edge location. Elemental cutting forces in the x, y and z direction are calculated by coordinate transformation. The total cutting forces are calculated by integrating the elemental cutting forces of engaged cutting edge elements. This model is verified by slot and side cutting experiments of STD11 workpiece which was heat-treated to HRC45.

Keywords : Ball-End Mill(볼엔드밀), Helix Angle(헬릭스각), Cutting Force(절삭력), Cutting Force Coefficient(비절삭계수), Chip Load Area(절삭칩면적), Difficult-To-Cut Material(난삭재)

1. 서론

3차원 자유곡면의 가공은 항공, 자동차 뿐만 아니라 소형 전자부품의 제조에서 다이캐스팅 금형과 주형의 생산에 있어서 중요하다. 특히 자유곡면의 가공에 있어서 볼엔드밀은 현장에서 많이

사용되고 있으며 가공의 정밀성 및 가공 능률을 높이기 위하여 공구재료와 절삭날 형태가 다양한 볼엔드밀이 개발되고 있다. 그러나 볼엔드밀 가공 시 생기는 절삭력으로 인한 공구변형은 가공물의 형상 오차를 발생 시키며 부적절한 절삭조건은 공구의 수명을 급격히 단축 시킨다. 따라서 현장의 작업자들은 이러한 공구의 변형과 수명 단축을 피하기 위하여 절삭조건을 작게하여 결과적으로 가공시간 및 생산단가의 증가를 야기시켰다. 볼엔드밀 가공 시 생기는 절삭력은 공작물 재료, 절삭조건, 볼엔드밀의 기하학적 형상에 따라 변한다. 특히 볼엔드밀 가공은 선삭가공과 달리 단속 절삭이 일어나기 때문에 절삭력을 예측하기가 힘들므로 다양한 형태의 볼엔드밀에 대하여 절삭현상을 규명하고 절삭조건에 따른 절삭력을 예측할 수 있는 모델의 수립이 필요하다.

기존의 플랫엔드밀의 경우 미소 절삭날이 절삭에 참여하는 위치와 무관하게 일정한 절삭현상이 일어나지만 볼엔드밀의 경우 기하학적 형상이 복잡하기 때문에 절삭에 참여하는 미소 절삭날의 위치를 파악하기가 어렵고 절삭현상을 모델링하기가 쉽지 않다. 그러므로 양민양은 볼엔드밀의 절삭현상을 해석하기 위하여 실제 볼엔드밀 절삭 실험을 하지 않고 일반적인 선삭 가공에서 쉽게 얻어질 수 있는 2차원 절삭 데이터를 이용하여 볼엔드밀의 형상계수와 절삭조건이 주어졌을 때의 절삭력을 모델링 하였다.⁽¹⁾ 이 모델들에서 얻어진 절삭력은 공작물의 절삭 특성의 초기치에 따라 절삭력 결과에 많은 영향을 미치며 선삭 가공으로부터 얻어진 데이터를 이용하므로 모델이

복잡해진다. Altintas는 볼엔드밀의 절삭력을 예측하기 위해 날끝력 계수(edge force coefficients)와 절삭력 계수(cutting force coefficients)를 도입하였다.⁽²⁾ 이러한 계수들은 2차원 직교절삭을 통하여 얻어진 전단응력, 절삭면상의 마찰계수 그리고 전단각 등을 통해 산출된다. 그러나 이 모델은 특정 공구와 공작물에 한하여 국한되며 2차원 직교절삭을 하기 위한 선삭 시편을 제작하는데 많은 불편이 따른다. 따라서 Elbestawi는 선삭가공을 수행하지 않고 절삭력을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.⁽³⁾ 이 모델에서 Elbestawi는 공구의 회전에 따른 절삭력이 비절삭계수와 xy, yz, zx평면에 투영 되는 칩단면적의 곱의 형태로 나타나는 기본적인 절삭력 함수들의 선형 조합으로 모델을 구성하였다. Imani는 경사면을 가공할 때 생기는 절삭력을 계산하기 위해 비절삭계수를 볼엔드밀의 미소절삭날의 위치에 따른 함수로 모델링 하였다.⁽⁴⁾ 또한 Fuh는 볼엔드밀 절삭날을 표현하는 곡선을 구의 표면과 경사진 평면과의 교차점들로 이루어진 함수로 모델링 하였으며 실제 공구회전 시 발생하는 런아웃의 영향을 고려한 절삭력 모델을 제시하였다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 금형 소재로 많이 쓰이고 있는 냉간 금형용 합금강의 일종인 STD11의 볼엔드밀링 시 발생하는 절삭력을 예측하는 모델을 제시하였다. 볼엔드밀이 회전할 때 절삭 깊이와 절삭날의 위치에 따른 칩 단면적을 산출하였다. 또한 x, y, z축방향 절삭력은 접선방향, 반경방향, 축방향 절삭계수들을 미소절삭날의 상대적인 위치의 함수로 가정하고 좌표변환을 통하여 산출하였다.

2. 칩 단면적 모델링

2.1 볼엔드밀의 헬릭스각

볼엔드밀의 기하학적 형상은 양민양⁽¹⁾에 의

해서 구의 표면과 경사평면으로 잘라진 경계로 해석되었으나 Altintas⁽²⁾는 미소 절삭날의 축방향 위치에 따라 헬릭스각이 변화는 모델을 제안하였다.

Fig. 1에서 미소절삭날이 z_j 의 위치에 있을 때 헬릭스각 λ_j 은 식(1)과 같다.

$$\lambda_j(z_j) = \tan^{-1} \left(\frac{R(z_j)}{R} \tan \lambda \right) \quad (1)$$

여기서 $R(z_j)$ 는 공구의 축방향 위치에 따른 반지름이 되며 식(2)와 같이 나타난다. R 는 볼엔드밀의 반지름, λ 는 헬릭스각 그리고 α 는 수직경사각이다. $\hat{e}_{Tj}, \hat{e}_{Rj}, \hat{e}_{Aj}$ 는 미소 절삭날이 z_j 의 위치에 있을 때 접선방향, 반경방향, 축방향 단위 벡터를 나타내고 있다.

$$R(z_j) = \sqrt{R^2 - z_j^2} \quad (2)$$

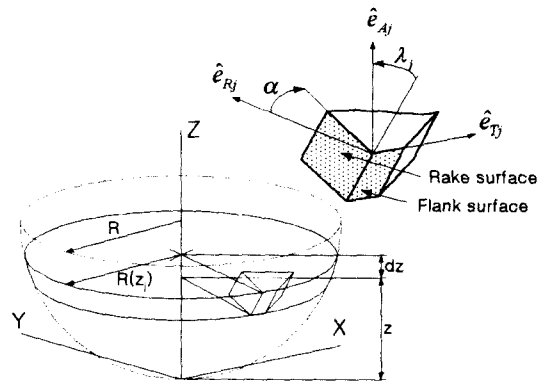


Fig. 1 Elemental cutting edge of ball-end mill

2.2 슬롯 밀링 시 칩단면적

절삭력을 해석하기 위해 절삭 칩 단면적의 계산이 필요하다. 과거 많은 연구자들은 볼엔드밀이 기하학적으로 복잡하기 때문에 식(3)과 같이 단순화된 칩두께 t 를 구할 수 있는 모델을 사용하였다.

$$t(\theta) = f \sin(\theta) \quad (3)$$

여기서 f 는 날당 이송량(mm/tooth)이고 θ 는 공구의 회전에 따른 절삭날의 상대적 위치를 나타내고 있다. 그러나 볼랜드밀 가공 시 절삭 개시점이 Fig.2에서 나타나는 것과 같이 0° 에서 절삭이 시작되지 않는다. 따라서 미소절삭날이 z_j 의 위치에 있을 때 절삭 개시점 $\theta_{st,j}$ 과 종료점 $\theta_{ed,j}$ 는 각각 식(4)와 식(5)와 같이 나타난다. Fig. 2에서 O_1, O_2 는 볼랜드밀이 한 회전할 때의 중심점을 나타낸다. Fig. 3에서 미소절삭날의 위치가 공구선단에 가까울수록 절삭 개시점 $\theta_{st,j}$ 는 값이 커짐을 볼 수 있다.

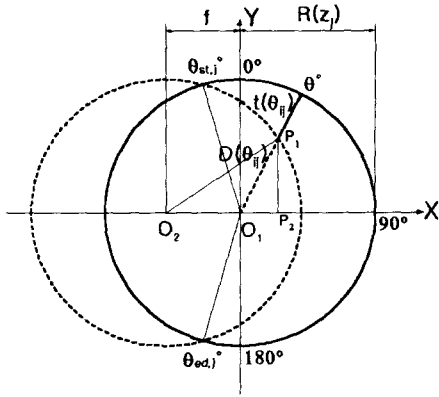


Fig. 2 Undeformed radial chip thickness

$$\theta_{st,j} = -\sin^{-1}\left(-\frac{f}{2R(z_j)}\right) \quad (4)$$

$$\theta_{ed,j} = \sin^{-1}\left(-\frac{f}{2R(z_j)}\right) + \pi \quad (5)$$

여기서 미소절삭날의 위치 θ_j 에서 칩두께 $t(\theta_j)$ 는 식(6)와 같이 나타나며 $R(z_j)$ 에서 선분 $\overline{O_1P_1}$ 의 길이인 $D(\theta_j)$ 를 뺀 것과 같다.

$$t(\theta_j) = R(z_j) - D(\theta_j) \quad (6)$$

식(5)에서 $D(\theta_j)$ 는 식(7)과 같이 된다.

$$D(\theta_j) = -f \sin \theta_j + \sqrt{R(z_j)^2 - (1 - \sin^2 \theta_j) f^2} \quad (7)$$

식(6), 식(7)에서 θ_j 는 i 번째 날의 미소절삭날의 위치를 나타내며 식(8)과 같다.

$$\theta_j(\Theta, z_j) = \Theta - \frac{z_j}{R} \tan \lambda - (i-1) \frac{2\pi}{n} \quad (8)$$

여기서 Θ 는 볼랜드밀의 회전각, n 은 절삭날의 개수를 나타낸다.

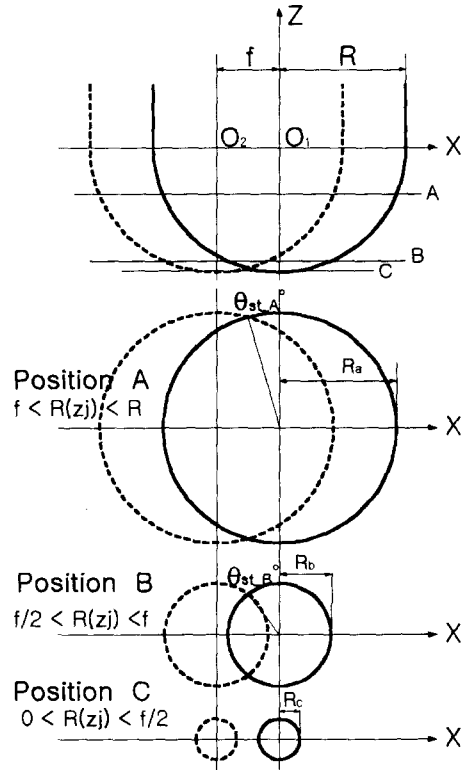


Fig. 3 Cutting starting points by cutting location

3. 절삭력 예측 모델

선삭 실험에서 나타나는 절삭력은 가공 실험결과 식(9)와 같이 비절삭계수 K 와 절삭폭 w 그리고 절삭깊이 t 의 지수승에 비례한다.

$$F = Kwt^m \quad (9)$$

Altintas⁽²⁾는 선삭실험을 통해 얻어진 절삭계수를 볼랜드밀 절삭력 예측에 사용 하였다. 본 연

구에서는 볼랜드밀의 절삭력을 예측하기 위한 접선방향, 반경방향, 축방향 비절삭계수를 미소절삭날의 위치의 함수로 가정하여 식(10), (11), (12)와 같이 무차원화된 3차식으로 나타내었다.

$$K_T(z_j) = a_0 + a_1 \left(\frac{z_j}{R}\right) + a_2 \left(\frac{z_j}{R}\right)^2 + a_3 \left(\frac{z_j}{R}\right)^3 \quad (10)$$

$$K_R(z_j) = b_0 + b_1 \left(\frac{z_j}{R}\right) + b_2 \left(\frac{z_j}{R}\right)^2 + b_3 \left(\frac{z_j}{R}\right)^3 \quad (11)$$

$$K_A(z_j) = c_0 + c_1 \left(\frac{z_j}{R}\right) + c_2 \left(\frac{z_j}{R}\right)^2 + c_3 \left(\frac{z_j}{R}\right)^3 \quad (12)$$

따라서 식(10),(11),(12)으로부터 미소절삭날에 걸리는 접선방향, 반경방향, 축방향 미소절삭력은 식(13),(14),(15)와 같이 된다. 여기서 공구 회전에 따른 칩 두께가 미소절삭력에 반영되는 영향의 정도를 나타내는 지수계수 m_T, m_R, m_A 는 실험을 통해 얻어질 수 있다.

$$dF_{Tij} = K_T(z_j)t(\theta_{ij})^{m_T} \quad (13)$$

$$dF_{Rij} = K_R(z_j)t(\theta_{ij})^{m_R} \quad (14)$$

$$dF_{Aij} = K_A(z_j)t(\theta_{ij})^{m_A} \quad (15)$$

또한 식(13),(14),(15)로부터 절삭에 참여하는 미소절삭날에서의 절삭력을 XYZ방향으로 좌표변환하고 이를 축방향 요소들로 합함으로써 공구의 회전 시 각축의 절삭력을 식(16),(17),(18)과 같이 나타낼 수 있으며 κ_j 는 식(19)와 같다.

$$F_x(\Theta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left[-dF_{Rij} \sin \kappa_j \sin \theta_{ij} - dF_{Tij} \cos \theta_{ij} - dF_{Aij} \cos \kappa_j \sin \theta_{ij} \right] dz \quad (16)$$

$$F_y(\Theta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left[-dF_{Rij} \sin \kappa_j \cos \theta_{ij} + dF_{Tij} \cos \theta_{ij} - dF_{Aij} \cos \kappa_j \cos \theta_{ij} \right] dz \quad (17)$$

$$F_z(\Theta) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left[-dF_{Rij} \cos \kappa_j - dF_{Aij} \sin \kappa_j \right] dz \quad (18)$$

$$\kappa_j = \cos^{-1} \left(\frac{R - z_j}{R} \right) \quad (19)$$

4. 절삭력 측정 실험

4.1 실험장치 및 절삭실험 개요

실험에 사용된 공작물은 냉간 금형용 합금강의 일종인 STD11로 Cr 및 Mo이 다량 함유되어 있는 난삭성을 가진 재료이다. Table 1.은 STD11의 화학성분을 나타내고 있다. 또한 경도를 일정하게 하기 위하여 HRC45로 열처리하였다.

Table 1. STD11의 화학성분

구분	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
STD11	1.4 - 1.6	<0.4	<0.6	<0.03	<0.03	4.5 - 5.5	0.8 - 1.2	0.2 - 0.5

절삭실험에 사용된 볼랜드밀은 날수 2개인 $\phi 10$ 의 코팅초경 볼랜드밀이며 헬릭스각(helix angle)은 30° 이다. 절삭가공은 회전 수평형 머시닝센터(MCH-5H)에서 수행하였고 절삭력 데이터는 공구동력계(Kistler, 9257B)를 설치하여 절삭저항을 측정하였다. 공구동력계에서 얻어진 신호는 공구동력계 앰프(charge amplifier) Kistler, 5011B를 사용하여 증폭되었고 이러한 절삭력 신호는 오실로스코프(LeCroy, 9314A) 및 PC의 A/D보드를 이용하여 관찰되거나 디지털화되어 저장되었다.

지수계수 m_T, m_R, m_A 와 접선방향, 반경방향, 축방향 비절삭계수 함수의 상수들을 구하기 위하여 축방향 절삭깊이 5mm 날당 이송량 0.02mm/tooth, 스피indle회전수 1000rpm으로 하여 슬롯 절삭을 수행하였다. 구하여진 지수 계수와 비절삭계수들은 다음과 같다.

$$m_T = 0.871$$

$$m_R = 0.853$$

$$m_A = 0.870$$

$$K_T(z_f) = 3382 - 2507\left(\frac{z_f}{R}\right) + 1416\left(\frac{z_f}{R}\right)^2 + 225\left(\frac{z_f}{R}\right)^3$$

$$K_R(z_f) = 2280 + 1255\left(\frac{z_f}{R}\right) - 4953\left(\frac{z_f}{R}\right)^2 + 1617\left(\frac{z_f}{R}\right)^3$$

$$K_A(z_f) = -53 + 35\left(\frac{z_f}{R}\right) - 21\left(\frac{z_f}{R}\right)^2 + 5\left(\frac{z_f}{R}\right)^3$$

4.2 실험결과 및 분석

공구회전에 따른 절삭력 모델을 검증하기 위하여 절삭깊이를 다르게 하면서 절삭실험을 수행하였다. Fig 4.는 슬롯 절삭이후 구하여진 절삭계수로부터 공구가 회전할 때 회전각에 따른 XYZ축방향 절삭력을 보여 주고 있다. 여기서 불엔드밀의 날수가 2개라도 헬릭스각이 30°이므로 절삭이 180°에서 끝나지 않고 약 210°에서 끝나고 있음을 볼 수 있다. Fig.5는 공구가 회전할 때 칩의 단면적을 나타낸 것이다. Fig.6과 Fig. 7은 축방향절삭깊이 5mm, 반경방향 절삭깊이 1mm, 1날당 이송량 0.02mm /tooth로 하고 하향 밀링으로 가공할 때, XY방향 절삭력을 나타내고 있다. 여기서 예측결과와 실험결과가 약간의 차이가 나는 것을 볼 수 있는데 이는 공구의 런아웃으로 인해 발생된다

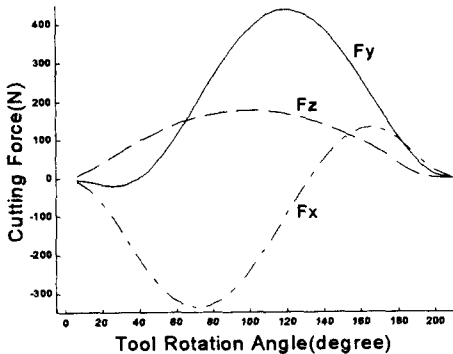


Fig. 4 Cutting force components for slot cutting

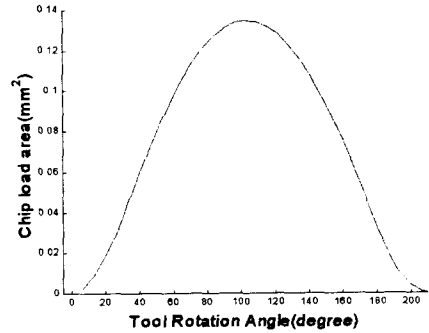


Fig. 5 Chip load area

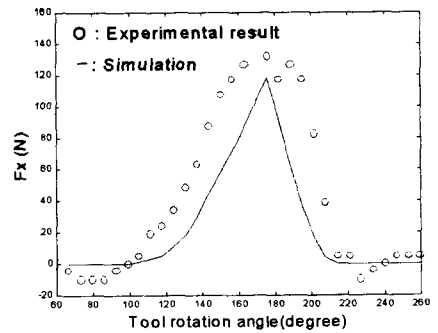


Fig. 6 Cutting Force in x direction

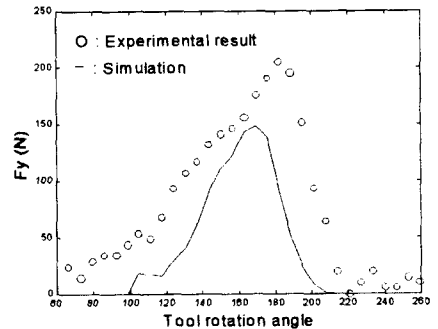


Fig. 7 Cutting Force in y direction

Fig.8과 Fig.9는 축방향 절삭깊이 2.5mm, 반경방향 절삭깊이 2.5mm, 1날당 이송량 0.02mm /tooth 이고 하향 밀링 일 때, XY방향 절삭력을 나타내고 있다.

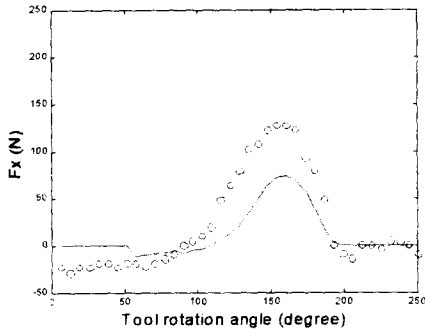


Fig. 8 Cutting Force in x direction

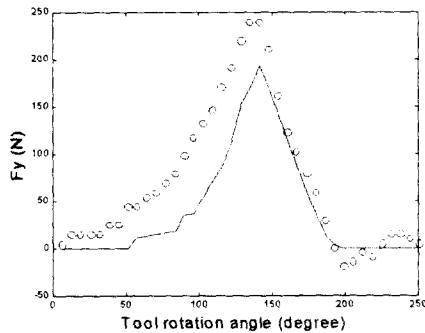


Fig. 9 Cutting Force in y direction

5. 결론

본 논문에서 공구회전에 따른 절삭력을 구하기 위하여 접선방향, 반경방향, 축방향 미소비절삭계수를 미소절삭날의 축방향 위치에 따른 3차식의 함수로 가정하고 절삭실험을 통하여 절삭 계수를 산출하였다. 그리고 볼엔드밀의 복잡한 기하학적 형상으로 인한 칩 면적을 계산하기 위하여 축방향 위치에 따라 절삭 시작점과 절삭 종료점을 산출하고 이를 통하여 칩의 면적을 계산하였다. 또한 축방향과 반경방향 절삭깊이를 변화시키면서 절삭 실험을 수행하여 예상 절삭력과 측정된 절삭력을 비교하였다. 본 모델은 실제 현장에서 절삭공정 시 과도 절삭으로 인한 공구휨의 정도와 가공 오차 예측을 할 수 있도록 응용될 수 있다.

- (1) Yang, M.Y. and Park, H.D., "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.31, No.1, pp.45-54, 1991.
- (2) P.Lee and Y.Altintas, "Prediction of Ball-End Milling Forces from Orthogonal Cutting Data", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.36, No.9, pp.1059-1072, 1996.
- (3) F.Abrari, M.A.Elbestawi, "Closed Form Formulation of Cutting Forces for Ball and Flat End Mills", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.37, No.1, pp.17-27, 1997.
- (4) B.M.Imani, M.H.Sadeghi, M.A.Elbestawi, "An Improved Process Simulation System for Ball-End Milling of Sculptured Surfaces", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.38, pp.1089-1107, 1998.
- (5) Chinng-Chih Tai, Kuang-Hua Fuh, "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.35, No.4, pp.511-534, 1995.