

## 엔드 밀링의 가공 표면 정밀도 예측과 해석

고정훈\*(포항공대 대학원 기계공학과), 윤원수(터보테크), 조동우(포항공대 기계공학과)

### Prediction and analysis of the machined surface accuracy in end milling

J. H. Ko (Dept. of Mech. Eng. , POSTECH), W. S. Yun (TURBOTEK Co.),  
D. W. Cho (Dept. of Mech. Eng., POSTECH)

#### ABSTRACT

Enhancement of the accuracy of products and productivity are essential to survive in a global industrial competition. This trend requires tighter dimensional tolerance specifications. To actively cope with the rapid change of the workpiece material and cutter geometry, a general method that can predict and analyze the machined surface is needed.

Surface generation model for the prediction of the topography of machined surfaces is developed based on cutting force model considering cutter deflection and runout. This paper presents the method that constructs the three-dimensional machined surface error following the movement of a cutter, irrespective of the variations of cutting conditions. In addition, the effects of the cutting forces and the kink shape on the machined surface are extensively investigated.

**Key Words** : Machined surface error (가공 표면 오차), Cutting force (절삭력), Kink shape (꼬임 현상)

#### 1. 서론

생산품의 정밀도와 생산성을 향상시키는 것은 국제 산업 경쟁에서 살아 남기 위해 필수적이다. 이러한 경향은 생산품의 더 엄격한 허용 형상 오차를 요구한다. 허용 오차 이내로 표면 가공 오차를 유지하면서 가공 시간을 줄이는 정형 가공 기술의 필요성이 증대되었다. 공작 기계를 이용한 생산품 가공에서 다양한 시편의 재질과 공구에 대해 가공 표면을 예측하고 해석할 수 있는 일반적인 모델이 필요하다.

가공된 표면 오차의 해석과 예측은 정확한 절삭력 모델을 기반으로 수행될 수 있다. 공구의 변형, 런아웃, 마모, 진동 등은 가공 표면의 정확도에 좋지 않은 영향을 미친다. 모든 요소들 중에서 공구 변형과 런아웃은 주요한 오차 요소이다. 대부분의 연구에서 가공 표면은 두가지 영향을 고려한 기계적 절삭력 모델로부터 예측하여 왔다. Kline et al.<sup>[1][2]</sup>는 공구의 휨과 런아웃을 고려한 형상 정밀도를 예측하기 위해 기계적 절삭력 모델을 개발하였다. Sutherland, DeVor<sup>[3]</sup>와 Babin<sup>[4]</sup> 또한 기계적

절삭력 모델을 개발하고 가공 표면을 예측하였다.

대부분의 표면 오차 예측 모델들은 고정된 절삭 조건 하에서 표면 오차를 예측하였다. 그러나 다양하게 변하는 절삭 조건을 가지는 순간적인 절삭이나 포켓 가공에는 적용하기가 힘들다.

이러한 관점에서 다양하게 변하는 절삭 조건에 관계없이 공구의 움직임에 따라서 3차원 가공 표면 오차를 예측하는 모델을 개발하였다. 부가적으로 가공 표면에 대한 절삭력의 영향과 꼬임 현상(kink shape)이 연구되었다.

#### 2. 가공 표면 오차의 개념

그림 1(a)와 같이 공칭 이송속도에 의해서만 이상적으로 거동한다고 가정할 경우 디스크 요소의 궤적은 원호로 가정할 수 있다. 이러한 가정은 절삭 이송 속도가 공구의 직경에 비해서 아주 작은 경우 적절한 가정이며 다수의 연구자들에 의해 사용되고 있다. 그러나 실제의 경우, 공구의 휨과 런아웃에 의해 디스크 요소의 중심 좌표는 공칭값에

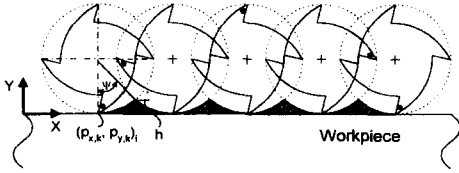


Fig. 1(a) Nominal case

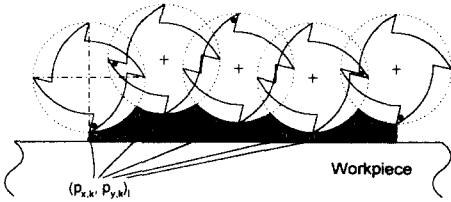


Fig. 1(b) Actual case

Fig 1 Intersection between cutter and workpiece for a k-th axial disk element during one revolution of a cutter

서 벗어나서 그림 1(b)와 같은 거동을 보이게 된다. 가공 표면 예측 모델은 절삭력 모델을 기반으로 이루어 졌으며 절삭력 모델은 런아웃과 공구의 휨을 고려하여 공구의 현재 위치를 계산한다.<sup>[5]</sup>

공구의 셀업시에 발생하는 공구의 런아웃은 그림 2에 나타난 바와 같이 음셀과 그 각도의 향으로 정의할 수 있다. 공구 런아웃에 의한 공구중심좌표의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_p(j) &= -\rho \sin(\alpha_{run} - \theta(j)) \\ y_p(j) &= -\rho \cos(\alpha_{run} - \theta(j)) \end{aligned} \quad (1)$$

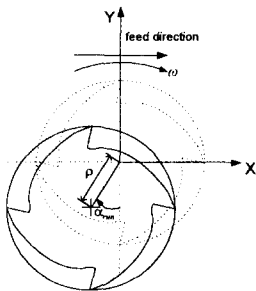


Fig. 2 Cutter runout and related parameters

그림 3은 공구를 외팔보로 가정하여 정적인 힘이 공구에 부과되었을 때의 공구의 휨을 나타내고 있다. z 축 디스크 요소 각각에 부과되는 힘을 이

용하여 각 디스크 요소의 위치를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_d(j, k) &= \frac{F_x(j-1)}{6EI} [(cf_x - z)^3 - (L - z)^3 \\ &\quad + 3(L - z)^2(L - cf_x)] \\ y_d(j, k) &= \frac{F_y(j-1)}{6EI} [(cf_y - z)^3 - (L - z)^3 \\ &\quad + 3(L - z)^2(L - cf_y)] \end{aligned} \quad (2)$$

절삭력 중심  $cf_x, cf_y$  는 디스크 요소들에서의 부분 절삭력에 의한 모멘트와 전체 절삭력에 의한 모멘트를 같게 됨으로써 계산된다. 본 연구에서는 영율,  $E = 217\text{Gpa}$ , 관성 모멘트,  $I = D^4/48$ 을 이용하였다.

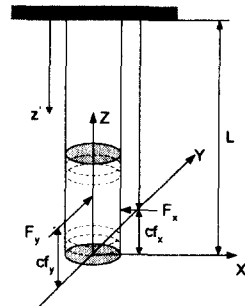


Fig. 3 Cutter deflection

공구의 움직임을 따라서 이미 계산된 미변형 칩 두께를 구하는 과정에서 얻어진 절삭날의 좌표를 이용하여 가공 표면의 오차를 보다 손쉽게 예측할 수 있다. 실제 가공의 경우, 가공 표면 오차는 절삭날이 가공 표면을 지나게 되는 절삭날 위치각이 "0"인 순간에서의 절삭날의 위치  $(p_{x,k}, p_{y,k})_i$ 를 이용하여 얻어질 수 있다. 그리고 각 디스크 요소에서의  $(p_{x,k}, p_{y,k})_i$ 좌표를 이용하여 3차원 가공 오차를 형성할 수 있다.

### 3. 가공 표면 오차 예측

모델을 검증하기 위하여 20여회의 절삭 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 다섯 가지의 절삭 조건에 대해서만 언급하고 있으며 표 1과 같다.

절삭폭, 절삭깊이, 절삭이송 속도를 바꿔가면서 실험을 수행하였으며, 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정하였다. HSS  $\phi 10$  4날 평면 엔드밀 공구

Table 1. Cutting conditions for test cuts

	절삭폭 (mm)	절삭깊이 (mm)	절삭이송속도 (mm/min)	스핀들 회전수 (rev/min)
Test 1	5.0	5.0	150	1000
Test 2	2.5	5.0	150	1000
Test 3	5.0	2.0	150	1000
Test 4	5.0	5.0	200	1000
Test 5	5.0	5.0	150	800

를 사용하였으며 대우중공업의 수직형 머시닝 센터 ACE-V30에서 실험하였다. 절삭력 측정은 공구 1회 전당 360개의 데이터를 얻을 수 있도록 하였으며 필터링은 하지 않았다. 시편은 알루미늄을 사용하였다.

그림 4(a)와 (b)는 각각 표 1의 절삭 조건 중 Test 1과 Test 2에 대하여 절삭력의 예측값과 측정값을 보여주고 있다. 절삭 가공시 모든 절삭력 값들이 가공 표면에 영향을 미치는 것은 아니다. 그림 4에서  $A_1, A_2, A_3$  그리고  $A_4$ 로 나타난 영역의 절삭력 값들만이 표면오차에 영향을 미치게 된다. 그림  $A_1$ 에 해당하는  $0 < |\theta| < \theta_{hl}$ 의 영역에서, 절삭날의 위치각이  $\phi = 0^\circ$ 가 되는 곳에서의 절삭력이 가공 표면에 영향을 미치게 된다. 공구 회전각을 이용하여 가공표면에 영향을 미치는 절삭력의 부분,  $A_i$ 는 식 (3)과 같이 정리될 수 있다.

$$A_i : \frac{\pi}{2} < |\theta| < \frac{\pi}{2} + \theta_{hl}, (i=1, \dots, 4) \quad (3)$$

여기서,  $\theta_{hl} = d_a \frac{\tan \theta_h}{R}$

그림 4(a)와 (b)는 각각 표 1의 절삭 조건 중 Test 1과 Test 2에 대하여 예측된 가공 표면 형상을 나타내고 있다. 공구가 다섯 번의 회전을 하면서 가공면을 지나갔을 때의 표면에 남겨진 오차량을 3차원으로 나타낸 예측값이다. 그림 5(a)에서는 z-축을 따라 가공 오차가 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 절삭에 참여한 날들에 대해서 가공의 바닥면보다는 위쪽 면에서 오차가 더 크게 나타나고 있음을 의미한다. 이러한 경향은 Test 3, 4, 5에서도 나타난다. 그림 5(b)는 이와 반대 현상을 보이고 있으며 더욱이 위쪽 면 부근에서 꼬임현상(kink shape)이 나타나고 있다.

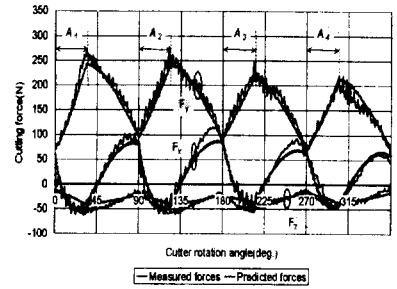


Fig. 4(a) For Test 1

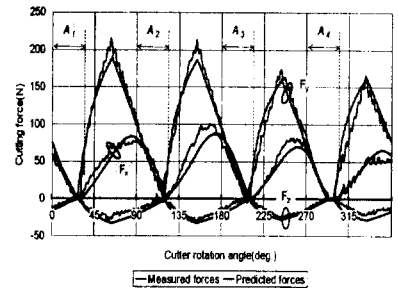


Fig. 4(b) For Test 2

Fig. 4 Portions of cutting force profile affecting the surface error

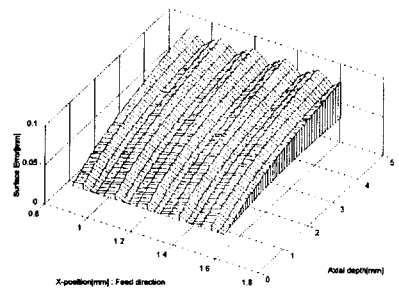


Fig. 5(a) For Test 1

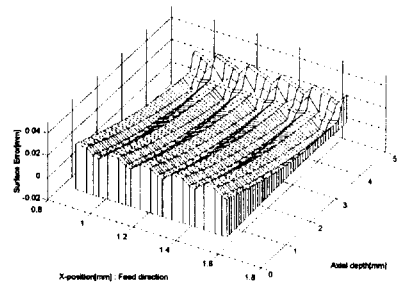


Fig. 5(b) For Test 2

Fig. 5 Predicted machined surface for actual cases

#### 4. 가공 표면 오차의 해석

예측된 표면 형상을 해석하기 위하여 그림 6에 개략적으로 가공면의 오차를 그려보았다. Fig. 4(a)를 보게 되면 Test 1의 경우에는 바닥 디스크 요소의 날 위치각이  $\phi = 0^\circ$  일 경우, 다시 말해서  $|\theta| = 0^\circ$  일 때, y 방향 절삭력이 상대적으로 작게 나타나고  $|\theta|$ 가 증가함에 따라서 y방향 절삭력이 증가함을 알 수 있다. 이로 인하여 바닥날이 가공면을 통과할 경우, 상대적으로 작은 가공 오차가 발생한다. 이와 반대로 가공의 진행중에, 최상위 디스크 요소가  $\phi = 0^\circ$  을 지날 경우, 최대의 가공 오차를 나타내게 된다. 따라서 그림 5(a)와 같은 가공 표면을 얻게 되는 것이다.

그러나 Test 2의 경우는 이와는 달리 y 방향 절삭력이 다른 경향을 보이고 있다.  $|\theta| = 0^\circ$  에서  $|\theta| = \theta_{hl}$  까지의 공구 회전각에서 y 방향 절삭력은 감소하고 있으며 이는 z 축을 따라서 가공오차의 감소를 유도하게 된다. 그러나 y 방향 절삭력이 최저점을 통과한 후 다시 증가하게 되어 가공 오차가 증가하는 현상을 보이게 된다. 이러한 경향은 가공 표면 예측에 잘 반영되고 있으며 꼬임현상으로 나타나게 된다. 이러한 꼬임 현상은 절삭날이 가공면을 지날 때 절삭력의 변화에 따른 공구힘의

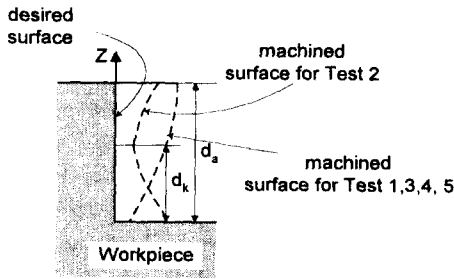


Fig. 6(a) Examples of a machined surface

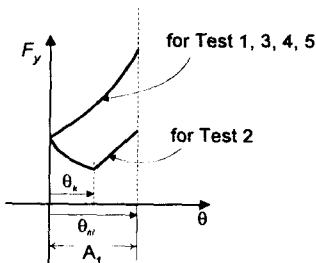


Fig. 6(b) Examples of a cutting force profile  
Fig. 6 Schematic views of a machined surface and a cutting force profile for test cuts

상대적인 차이에 의해서 발생하는 것으로 설명된다. 그림 4(b)에 2차원 평면에서 나타낸 개략도로서 꼬임 현상을 나타내었다. 이론적으로 꼬임현상이 발생하는 위치는 다음과 같이 예측될 수 있다.

$\theta_k$ 는 절삭력의 최저 위치(valley position)의 공구 회전각을 의미한다.

$$d_k = \frac{\theta_k}{\theta_{hl}} \cdot d_a \quad (4)$$

Test 1, 3, 4, 그리고 5의 경우에는  $\theta_k$ 가 제로이기 때문에  $d_k$ 값이 제로가 된다. 그러나 Test 2의 경우,  $\theta_k = 30^\circ$  그리고  $\theta_{hl} = 33^\circ$  이므로  $d_k \cong 4.55mm$ 가 된다.

#### 5. 실험적 증명

가공면 오차 해석 모델을 검증하기 위하여 본 연구의 테스트 가공에 대해서 가공 표면을 측정하였다. Northwestern University에서 WACO 장비를 이용하였으며  $13.63 \mu m$ 의 간격으로 샘플링하였다. 그림 7(a)는 Test 1의 조건으로 가공하였을 때, 가공 표면의 3차원 오차를 측정된 것이다. 그림 7(a)의 예측된 오차와 유사한 형상을 가짐을 알 수 있다. 또한 그림 7(b)는 하나의 단면에서의 2차원 오차를 나타낸 결과이다. Fig. 5(a)에서 예측 오차량의 최고/최저값의 차이가 대략  $42 \mu m$ 정도인 것을 알 수 있으며 그림 7(a)의 결과에서는 대략  $48 \mu m$ 정도인 것으로 나타나고 있어 예측값과 측정값이 매우 유사한 값을 보여주고 있다. 그림 8은 Test 2의 조건으로 가공했을 때의 표면 형상이며, 그림 7과는 형상이 상당히 다르게 나타남을 알 수 있으며 Z 축을 따라서 대략  $4.5mm$  지점에서 꼬임 현상이 발생하고 있다. 최대 편차는 대략  $50 \mu m$ 정도이며 그림 5(b)와 비교했을 때, 유사한 형상을 보이고 있음을 알 수 있고, 해석에서 예측했던 꼬임현상의 발생 지점이 거의 일치하고 있는 결과를 보이고 있다. 실제 측정의 경우에는 대략  $4.5mm$  지점에서 꼬임현상이 발생하고 있으며, 본 연구에서는  $4.55mm$  지점이라고 예측되었다. 절삭 속도를 변화시킨 Test 4와 Test 5의 경우에도 예측값과 아주 유사한 형상을 보이고 있다. 최대 편차값이 Test 4의 경우, 측정값이 대략  $65 \mu m$ 정도이며 Test 5의 경우, 대략  $60 \mu m$ 정도인 것으로 측정되었다. 예측값에서는 Test 4의 경우  $60 \mu m$ 이며, Test 5의 경우  $55 \mu m$ 인 것이었고 실제 측정값과 매우 유사한 결과

를 보였다.

가공 표면의 오차를 측정하는 것은 고가의 장비는 물론이고 아주 까다로운 측정 환경이 요구되는

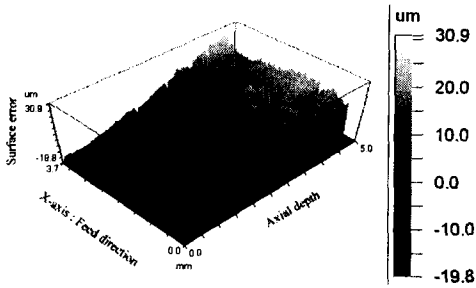


Fig. 7(a) Three-dimensional plot

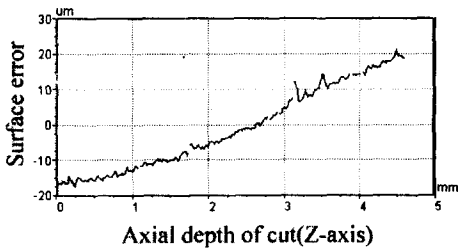


Fig. 7(b) Two-dimensional plot

Fig. 7 Measured machined surface error for Test 1

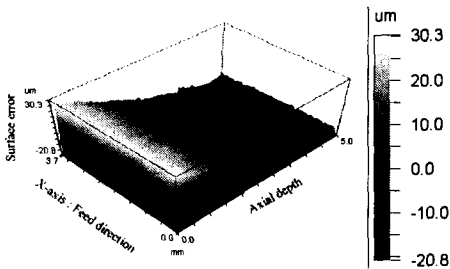


Fig. 8(a) Three-dimensional plot

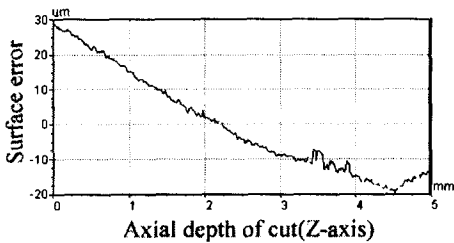


Fig. 8(b) Two-dimensional plot

Fig. 8 Measured machined surface error for Test 2

힘은 작업이다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 개발된 모델들이 실제 가공 현상을 매우 잘 반영하고 있음을 알 수 있으며 예측값의 정확성으로 인하여 실제 가공 이전에 가공 오차를 파악할 수 있는 중요한 연구 결과라 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서의 결과는 가공 표면 오차 모델을 통해서 가공 후의 표면 형상을 정밀하게 예측할 수 있으므로 정형 가공의 기술을 한 층 더 향상시킬 수 있다.

1) 가공 표면에 수직인 절삭력의 일부분만이 가공 표면에 영향을 준다. 가공된 표면의 모양 및 꼬임 현상은 표면에 영향을 주는 절삭력의 형상으로 해석이 가능하다.

2) 표면 오차는 공구의 움직임에 따라 예측될 수 있기 때문에 제시된 방법은 일반적인 엔드밀 가공에서 쉽게 구현될 수 있다.

3) 가공 표면 오차의 예측값과 측정값의 비교에서 예측 오차는 3.4%와 8.3%의 사이에 있으므로 제시된 방법은 유용하다.

## 참고문헌

1. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 272-278.
2. DeVor, R. E., Sutherland, J. W., and Kline, W. A., 1983, "Control of Surface Error in End Milling," Eleventh North American Manufacturing Research Conference Proceedings, pp. 356-362
3. Sutherland, J. W., and DeVor, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 269-279.3.
4. Babin, T. S., 1988, "The modeling, characterization, and assessment of end milled surfaces", Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana Champaign.4.
5. W.S.Yun, D.W.Cho and K.F.Ehmann, "Determination of Constant 3D Cutting Force Coefficients and Runout paramters in End Milling," NAMRC XXVII, May 25-28, 1999, pp.87-92.