

# 엔드밀링 절삭력에 미치는 공구형상오차 I

-상향 엔드밀링-

이영문(경북대 기계공학부), 최원식(밀양대 기계공학부),  
 송태성, 권오진\*, 백승기(경북대 대학원 기계공학과)

Effects of cutter runout on end milling forces I

-Up end milling-

Y. M. Lee(Mech. Eng. Dept., KNU), W. S. Choi(Mech. Eng. Dept., MYU),  
 T. S. Song, O. J. Kwon\*, S. K. Baek(Graduate School, KNU)

## ABSTRACT

In end milling process, the undeformed chip section area and cutting forces vary periodically with phase change of the tool. However the real undeformed chip section area deviates from the geometrically ideal one owing to cutter runout and tool shape error. In this study, a method of estimating the real undeformed chip section area which reflects cutter runout and tool shape error was presented in up end milling process using measured cutting forces. Size effect was identified from the analysis of specific cutting resistance obtained by using the modified undeformed chip section area.

**Key Words** : Cutter runout (공구 런아웃), Size effect (치수효과), Undeformed chip section area (미변형칩단면적), Cutting force (절삭력), Specific cutting resistance (비절삭저항)

## 1. 서론

공구의 런아웃은 다인공구에 의한 절삭공정에서 나타나는 일반적인 현상이며, 특히 정밀기계산업에서 폭넓게 사용되고 있는 단속절삭공정인 밀링가공시 제품의 정밀도, 표면거칠기 및 절삭특성을 저하시킨다.

Martellotti<sup>(1)</sup>는 밀링가공면의 이론적인 표면거칠기 모델을 제시하였으나, 실제 측정된 표면거칠기는 공구런아웃과 스핀들의 회전에 의한 주기적인 특성을 나타내고 있음을 보인바 있다.

한편 National Twist Drill사<sup>(2)</sup>에서는 밀링가공에 대한 폭넓은 연구를 통하여 공구의 런아웃이 0.001 in 이하로 제한되어야 할 필요성을 강조한바 있다. 또한 밀링공정에서의 절삭력에 대한 기하학적 모델 제시<sup>(3)</sup>와 절삭력에 미치는 중요한 인자인 공구런아웃의 영향을 밝히려는 연구<sup>(4)</sup>가 보고된 바 있다.

그러나 공구 자체의 오차와 공구 홀더 및 스핀들 오차 등 복합적 작용에 대한 해석의 어려움으로 인해 일반적으로 공구런아웃을 배제한 절삭력 예측 모델제시나 해석<sup>(5)</sup>이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 엔드밀링공정 해석을 위해 결정되어야 하는 미변형칩단면적에 있어서 공구런아웃을 고려한 수정 미변형칩단면적과 이로부터 계산되는 실제 절삭저항특성을 구하기 위한 방법을 제시하였다.

## 2. 상향 엔드밀링모델

Fig. 1은 4날 엔드밀에 의한 상향 엔드밀링 절삭시 공구축에 수직한 단면을 나타낸 것으로 테이블이 이송하는 것을 대신하여 공구가 절삭날당 St만큼 이송하면서 회전할 때의 공구와 피삭재 사이의 기하학적 관계를 나타낸 것이다. 그림에서  $\phi$ 는 기준 위치

로부터 공구의 회전각을 나타내고,  $h$ 는 회전각  $\phi$ 일 때 절삭날 경로 사이의 반경방향 길이차로서 절삭공구의 반경방향 이송량을 의미한다.  $h$ 는 기준위치의 0에서부터 점점 증가하여 최대값  $h_{max}$ 에 이른 후 다시 급격히 감소하여 0에 이른다. 그림에서  $a$ 는 반경방향 절삭깊이를 나타낸 것이다.

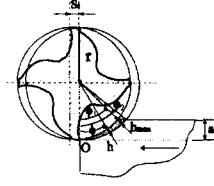


Fig. 1 Cutting model of up end milling

식(1)은  $h_{max}$ 를, 식(2)는 그 때의 회전각  $\phi_1$ 을 나타내며, 식(3)은 한 날이 회전각 0으로부터 시작하여 피삭재에서 벗어날 때의 회전각  $\phi_2$ 를 나타내고 있다. 여기서  $r$ 은 공구반경을 나타낸다.

$$h_{max} = r - \sqrt{(r-a)^2 + [\sqrt{r^2 - (r-a)^2} - s] \cdot \phi} \quad (1)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1} \left( \frac{r-a}{r-h_{max}} \right) \quad (2)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1} \left( \frac{r-a}{r} \right) \quad (3)$$

한편 미변형칩단면적은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dA = h dz \quad (4)$$

Fig. 2는 미변형칩단면적을 구하기 위한 미변형칩두께  $h$ 와 미소절삭폭  $dz$ 를 나타낸 것이다. 그림에서  $b$ 는 축방향 절삭깊이,  $\beta$ 는 엔드밀의 헬릭스각을 나타낸다.

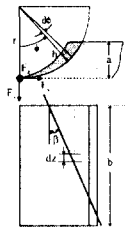


Fig. 2 Coordinate system for up end milling and cutting force components

미변형칩두께  $h$ 의 결정을 위해 미변형칩의 단면을 Fig. 3과 같이 실제 미변형의 칩의 면적과 등가인 삼각형으로 가정하였다.

반경방향 이송  $h$ 는 Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 날이 기준 위치로부터  $\phi_1$ 사이의 임의의 각도  $\phi$ 일 때는 식(5)로, Fig. 3(b)에 나타난 것처럼  $\phi_1$ 에서

$\phi_2$ 사이의 임의의 각도  $\phi$ 일 때는 식(6)과 같은 비례식이 성립한다.

그리고 미소절삭면적의 높이  $h$ 에 대한 절삭폭  $dz$ 는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

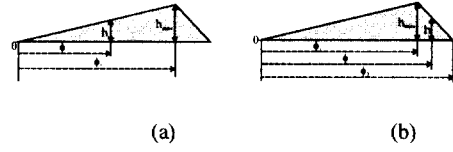


Fig. 3 Spread undeformed chip cross section

$$h = \frac{h_{max}}{\phi_1} \phi \quad (5)$$

$$h = \frac{h_{max} (\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \quad (6)$$

$$dz = \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (7)$$

Fig. 4는 임의의 각  $\phi$ 에서 날의 위치에 따른 절삭날의 작용구간을  $[0, \phi_1]$ ,  $[\phi_1, \phi_2]$ ,  $[\phi_2, \phi_3]$ ,  $[\phi_3, \phi_4]$  및  $[\phi_4, \phi_5]$  다섯 구간으로 나타낸 것이다.

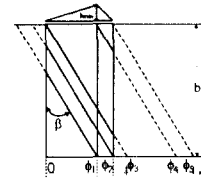


Fig. 4 Cutting edge length depends on cutting edge position

$\phi_3$ 는 식(8)로 표시할 수 있으며,  $\phi_4 = \phi_3 + \phi_1$ ,  $\phi_5 = \phi_3 + \phi_2$  관계가 성립한다.

$$\phi_3 = \frac{b \tan \beta}{r} \quad (8)$$

식(5), (6), (7)을 식(4)에 대입하면 날의 위치에 따른 미변형칩단면적을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$A = \int_0^{\phi_1} \frac{h_{max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (0, \phi_1) \text{ 구간} \quad (9-1)$$

$$A = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{max} (\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (0, \phi_2) \text{ 구간} \quad (9-2)$$

$$+ \int_0^{\phi_1} \frac{h_{max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$A = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{max} (\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (0, \phi_3) \text{ 구간} \quad (9-3)$$

$$+ \int_0^{\phi_1} \frac{h_{max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$A = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (\phi_3, \phi_4) \text{ 구간} \quad (9-4)$$

$$+ \int_{\phi_3}^{\phi_4} \frac{h_{\max} \phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan \beta} d\phi$$

$$A = \int_{\phi_3}^{\phi_4} \frac{h_{\max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (\phi_3, \phi_4) \text{ 구간} \quad (9-5)$$

Fig. 5는 식(9-1)~(9-5)를 이용하여 Table 1에 주어진 절삭조건에 상응하는 미변형칩단면적의 변화를 절삭시간에 따라 나타낸 것이다.

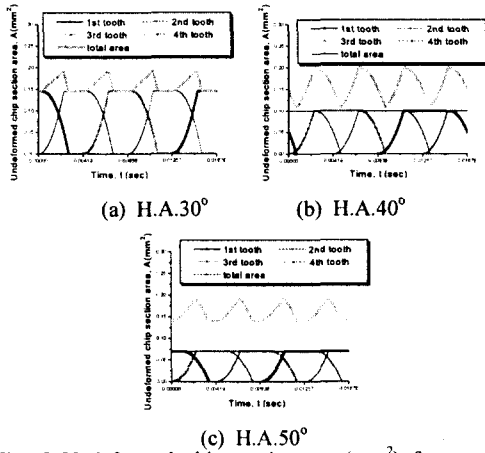


Fig. 5 Undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) for up end milling

Table 1 Cutting conditions

Radial depth of cut, a (mm)	1.5
Axial depth of cut, b (mm)	12
Cutting velocity, V (m/min)	90
Radial rake angle, $\alpha_r$ (°)	8
Helix angle, $\beta$ (°)	30, 40, 50
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, S <sub>t</sub> (mm)	0.06

그림에서 보는 바와 같이 개개의 날에 의한 미변형칩단면적의 변화는 30°인 경우가 가장 크며, 40°, 50° 순으로 작아지지만 표 1에 나타낸 절삭조건 하에서, 각 날의 중첩에 의한 절삭단면적의 변화는 그림에서 보는 바와 같이 헬릭스각 40°인 경우 진폭이 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 중첩된 절삭단면적이 헬릭스각뿐만 아니라 절삭조건인 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이, 절삭날당 이송등의 복합작용에 의해 결정되어지기 때문이다.

### 3. 절삭실험

절삭실험에 사용한 공구는 날수 4, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀이었으며, 피삭재는 SM45C 이었다. 절삭실험 조건은 표1에 나타낸 바와 같다.

절삭력 성분을 구하기 위해서 공구동력계(Kistler, 9273)에서 나오는 절삭력 신호를 전하증폭기(Kistler, 5807A)를 통해 증폭시키고, 이것을 A/D변환기(Data translation, DT3831-G)로 보내어 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

절삭실험시 공작기계의 주축회전속도는 3581rpm (절삭속도 90m/min)이었으며, 절삭력 성분은 샘플링 주파수 2048Hz로 획득되었다. 따라서 샘플링 시간간격은 0.4883ms이며, 이에 대응되는 공구의 회전각은 10.49°이며 공구 1회전당 획득되는 데이터의 수는 대략 35개이었다.

## 4. 수정 미변형칩단면적의 결정

### 4.1 공구형상오차 및 런아웃의 영향을 배제한 이상적인 미변형칩단면적의 변화

Fig. 6(a), (b) 및 (c)는 공구 형상과 절삭조건에 의해 계산되는 이상적인 미변형칩단면적(Fig. 5)과 공구동력계로부터 측정된 절삭력 성분중 주분력성분 F<sub>r</sub>를 고주파 성분을 제거하여 각 주기의 최대값 및 최저값을 쉽게 찾을 수 있도록 500Hz low pass filter로 여과하여 함께 나타낸 것이다.

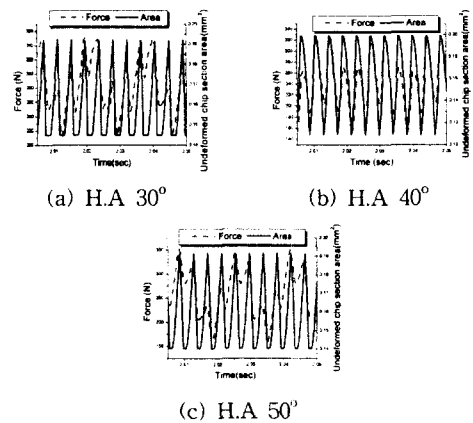


Fig. 6 Undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) and filtered cutting force by 500Hz low pass filter

절삭력과 절삭에 참여하는 미변형칩단면적이 비례관계에 있다고 가정하면, 이상적인 경우 획득된 절삭력 역시 주기와 변동 진폭이 일정한 절삭력이 얻어질 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 절삭력의 주기와 기하학적인 미변형칩단면적의 변동주기는 비교적 잘 일치하고 있으나 각 날에 대한 절삭력의 크기는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 절삭에 참여하는 실제 절삭단면적과 기하학적으로 계산되는 이상적인 절삭단면

적사이에 불가피하게 존재하는 차이에 기인한다.

Kline 과 Devor<sup>(4)</sup>는 이와 같은 runout이 주로 머시닝센터에서 공구홀더 중심과 엔드밀 중심이 다른 편심에 기인한다고 보고한 바 있다.

#### 4.2 공구형상오차 및 런아웃의 영향을 고려한 미변형칩단면적의 변화

Fig. 7은 여과된 절삭력과 그 파형을 기하학적으로 계산되는 미변형칩단면적에 반영하여 수정된 수정 미변형칩단면적을 나타낸 것이다.

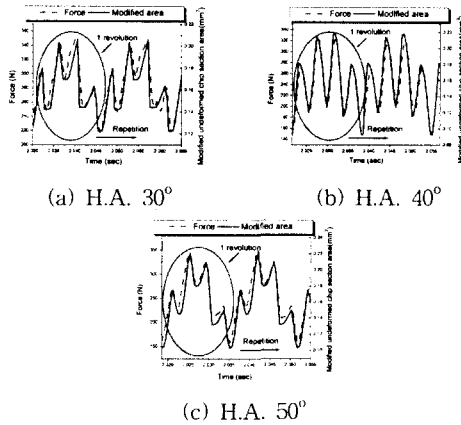


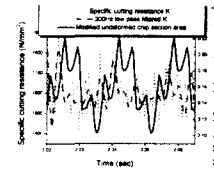
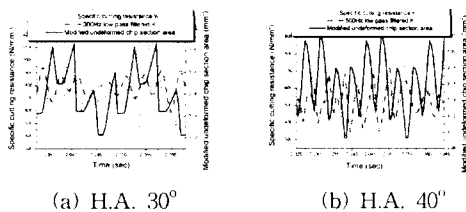
Fig. 7 Modified undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) and filtered cutting force by 500Hz low pass filter

그림에서 보는 바와 같이 1회전에 대해 공구 형상오차 및 공구 런아웃이 고려된 수정 미변형칩단면적의 면적변화는 다음회전에 대해서도 거의 같은 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 비절삭저항특성을 구하기 위해 측정된 절삭력을 본 논문에서 결정한 수정 미변형칩단면적으로 나누어 비절삭저항특성값 K를 구하였다.

#### 5. 치수효과

Fig. 8은 측정된 절삭력을 수정 미변형칩단면적으로 나누어 구해지는 비절삭저항특성값 K와 고주파성분을 제거한 K를 수정 미변형칩단면적과 함께 나타낸 것이다.



(c) H.A. 50°  
Fig. 8 Modified undeformed chip section area(mm<sup>2</sup>) and sepcific cutting resistance(N/mm<sup>2</sup>)

그림에서 보는 바와 같이 수정 미변형칩면적이 작을 때 비절삭특성값 K가 크게 나타나고 있으며 이는 치수효과<sup>(6)</sup>에 의한 것으로 판단된다.

#### 6. 결론

본 논문에서는 상향엔드밀링 공정에서 기하학적으로 구해지는 미변형칩단면적에 절삭력특성을 반영하여 공구 홀더와 공구사이의 편심에 기인하는 공구 런아웃, 공구형상오차 및 날끝 각도 오차가 고려된 수정 미변형칩단면적을 구하였다.

또한 실제 비절삭특성값 K를 수정 미변형칩단면적을 이용하여 구한 결과 치수효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. M.E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process," Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., p.63,p. 677, 1941.
2. Accuracy of milled surfaces 1-the effect of cutter diameter, number of teeth, runout and feed, Metal Cuttings, Vol. 9, p. 2, 1961.
3. Tlusty, J. and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21~25, 1975.
4. W. A. Kline and R. E. Devor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23 No. 2/3, pp123-140, 1983.
5. 이영문, 송태성, 심보경, "엔드밀링의 전단특성 및 마찰특성해석," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp.724-729, 2000.
6. Shaw, M.C., and Finnie, I., "The Shear Stress in Metal Cutting," Trans. of the ASME, Vol. 77, pp.115~125, 1955.