한국정밀공학회지 제19권 제8호 (2002년 8월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 8, August 2002.

엔드밀링 절삭력에 미치는 공구형상오차 I
- 상향 엔드밀링 -

이영문*, 양승한*, 송태성**, 권오진**, 백승기**

Effects of Cutter Runout on End Milling Forces I
- Up End Milling -

Young-Moon Lee*, Seung-Han Yang*, Tea-Seong Song**, O-Jin Kwon** and Seung-Ki Baek**

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. The average specific cutting resistance, K_a is defined as the main cutting force component divided by the modified chip section area. K_a value becomes smaller as the helix angle increases from 30° to 40°. But it becomes larger as the helix angle increases from 40° to 50°. On one hand, the K_a value shows a tendency to decrease with increase of the modified chip section area and this tendency becomes distinct with smaller helix angle.

Key Words : Cutter runout (공구 런아웃), Undeformed chip section area (미변형칩 단면적), Average specific cutting resistance (평균비절삭저항)

기호설명

ϕ= instantaneous rotation angle of tool
β= helix angle
s_t = feed per tooth
r = radius of tool
a = radial depth of cut
b = axial depth of cut
h = undeformed chip thickness
F_y = main cutting force component
K_a = average specific cutting resistance

1. 서론

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

Martellotti[1]는 밀링가공면의 이론적인 표면거칠

접수 2001년 11월 15일 접수
* 경북대학교 기계공학부
** 경북대학교 대학원 기계공학과

기 모델을 제시하였다. 그러나 실제 가공표면에서는 공구형상오차에 기인한 불규칙한 표면거칠기 특성이 나타나고 있음을 보인바 있다.

National Twist Drill사[2]에서는 밀링가공에 대한 폭넓은 연구를 통하여 바람직한 가공이 이루어지기 위해서는 런아웃의 최대값이 0.001in이하로 제한되어야함을 강조하였으며, 밀링공정에서의 절삭력에 대한 기하학적 모델제시[3]와 절삭력에 미치는 런아웃의 영향을 밝히려는 연구[4]가 보고된 바 있다.

그러나 대부분의 연구에서는 공구 자체의 오차와 공구 홀더 및 스핀들 오차 등 복합적 작용에 대한 해석의 어려움으로 인해 공구 런아웃을 배제한 절삭력 예측 모델제시와 이에 대한 해석[3,5,6]이 이루어지고 있는 실정이다.

본 논문에서는 엔드밀링공정 해석을 위해 공구 런아웃을 고려한 수정 미변형칩 단면적과 이로부터 계산되는 실제 비절삭저항을 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 및 운동학적 관계에 의해 한 개의 절삭날에 의해 제거되는 미변형칩의 단면을 나타낸 것이다. 그림에서 ϕ는 기준 위치(O)로부터 공구의 회전각을 나타내고, h는 회전각 ϕ일 때 절삭날 경로 사이의 반경방향 길이차로서 절삭공구의 반경방향 이송량 즉, 미변형칩두께를 나타낸다. h는 기준위치, O에서부터 점점 증가하여 최대값 h_{max}에 이른 후 다시 급격히 감소하여 0에 이른다. 그림에서 a는 반경방향 절삭깊이를 나타낸 것이다.

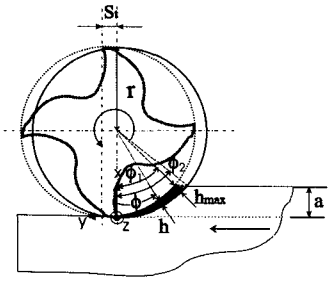


Fig. 1 Cutting model of up end milling

식(1)은 h_{max}를, 식(2)는 그 때의 회전각 ϕ_1을 나타내며, 식(3)은 한 날이 회전각 0으로 부터 시작하여 피삭재에서 벗어날 때의 회전각 ϕ_2를 나타내고 있다. 여기서 r은 공구반경을 나타낸다.

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

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

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

절삭력은 비절삭저항과 미변형칩 단면적의 곱으로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.[3] 여기서 F_y는 주절삭력 성분을, K_a는 평균비절삭저항을, A는 미변형칩 단면적을 나타낸다.

$$F_y = K_a \cdot A \quad (4)$$

한편 미소 미변형칩 단면적은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dA = h\,dz \quad (5)$$

Fig. 2는 미변형칩단면적을 구하기 위한 미변형칩두께 h와 미소절삭폭 dz를 나타낸 것이다. 그림에서 b는 축방향 절삭깊이, β 는 엔드밀의 헬릭스각을 나타낸다.

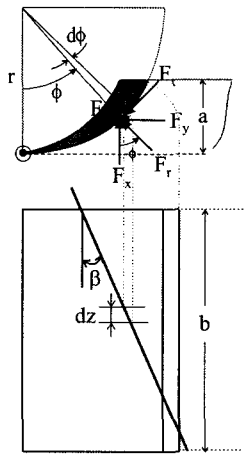
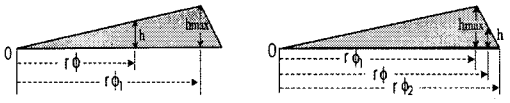


Fig. 2 Coordinate system for up end milling and cutting force components

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

반경방향 이송 h는 Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 날이 기준 위치로부터 ϕ_1사이의 임의의 각도 ϕ일 때는 식(6)으로, Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 ϕ_1에서 ϕ_2사이의 임의의 각도 ϕ일 때는 식(7)과 같은 비례식이 성립한다.

그리고 미소절삭면적의 높이 h에 대한 절삭폭 dz는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.



(a) (b)

Fig. 3 Spread undeformed chip cross section

$$h = \frac{h_{max}}{\phi_1}\phi \tag{6}$$

$$h = \frac{h_{max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \tag{7}$$

$$dz = \frac{r}{\tan\beta}d\phi \tag{8}$$

Fig. 4는 임의의 각 ϕ에서 날의 위치에 따른 절삭날의 작용구간을[0, ϕ_1], [ϕ_1, ϕ_2], [ϕ_2, ϕ_3], [ϕ_3, ϕ_4] 및 [ϕ_4, ϕ_5]의 다섯 구간으로 나타낸 것이다.

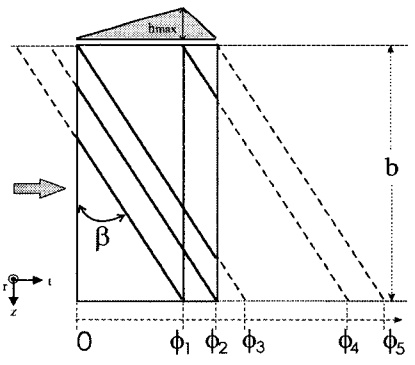


Fig. 4 Cutting edge length depends on cutting edge position

ϕ_3는 식(9)로 표시할 수 있으며, $\phi_4 = \phi_3 + \phi_1$, $\phi_5 = \phi_3 + \phi_2$의 관계가 성립한다.

$$\phi_3 = \frac{b\tan\beta}{r} \tag{9}$$

공구의 강성을 무한대로 간주하고 식(6), (7), (8)을 식(5)에 대입하면 날의 위치에 따른 미변형칩단면적을 다음과 같이 표시할 수 있다.

[0, ϕ_1]구간

$$A = \int_0^{\phi} \frac{h_{max}\phi}{\phi_1}\frac{r}{\tan\beta}d\phi \tag{10-1}$$

[ϕ_1, ϕ_2]구간

$$A = \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{h_{max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)}\frac{r}{\tan\beta}d\phi + \int_0^{\phi_1} \frac{h_{max}\phi}{\phi_1}\frac{r}{\tan\beta}d\phi \tag{10-2}$$

[ϕ_2, ϕ_3]구간

$$A = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)}\frac{r}{\tan\beta}d\phi + \int_0^{\phi_1} \frac{h_{max}\phi}{\phi_1}\frac{r}{\tan\beta}d\phi \tag{10-3}$$

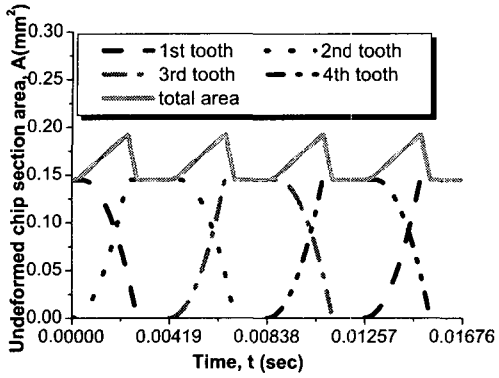
[ϕ_3, ϕ_4]구간

$$A = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{h_{max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)}\frac{r}{\tan\beta}d\phi + \int_{\phi-\phi_3}^{\phi_1} \frac{h_{max}\phi}{\phi_1}\frac{r}{\tan\beta}d\phi \tag{10-4}$$

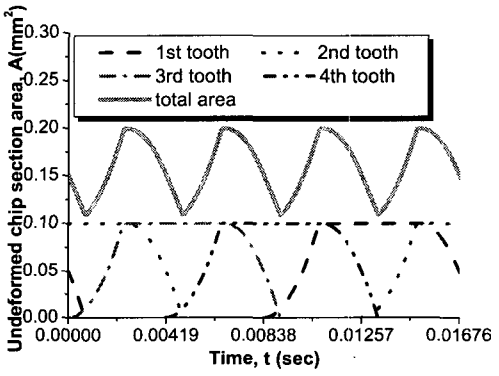
[ϕ_4, ϕ_5]구간

$$A = \int_{\phi-\phi_3}^{\phi_2} \frac{h_{max}(\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)}\frac{r}{\tan\beta}d\phi \tag{10-5}$$

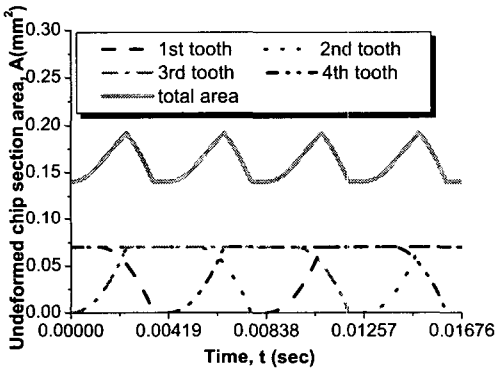
Fig. 5는 식(10-1)~(10-5)를 이용하여 Table 1에 주어진 절삭조건에 상응하는 미변형칩 단면적의 변화를 절삭시간에 따라 나타낸 것이다.



(a) Helix angle 30°



(b) Helix angle 40°



(c) Helix angle 50°

Fig. 5 Undeformed chip section area (mm^2) 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
Tool diameter, d(mm)	8
Helix angle, β(°)	30, 40, 50
Number of tooth, z	4
Feed per tooth, S_t (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.

Table 2는 하나의 절삭날이 작용해서 생성되는 최대 미변형칩 단면적과 네 개의 절삭날이 모두 작용하였을 때 생기는 중첩을 고려한 최대 미변형칩 단면적을 헬릭스각도에 따라 나타낸 것이다.

Table 2 Undeformed chip area(mm^2) as helix angle

Helix angle (°)	30	40	50
Max Area (one tooth)	0.1448	0.0996	0.0701
Max Area (total)	0.1921	0.1992	0.1917

3. 절삭실험

절삭실험에 사용한 공구는 날수 4, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀이었으며, 피삭재는 SM45C이었다. 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/D 변환기(Data translation, DT3831-G)로 보내어 PC에서 신호분석 기능을 갖고 있는 소프트웨어패키지(Global Lab)을 사용하여 분석하였다.

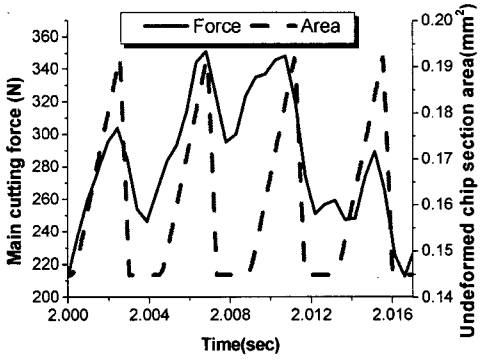
절삭실험시 공작기계의 주축회전속도는 3581

rpm (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.

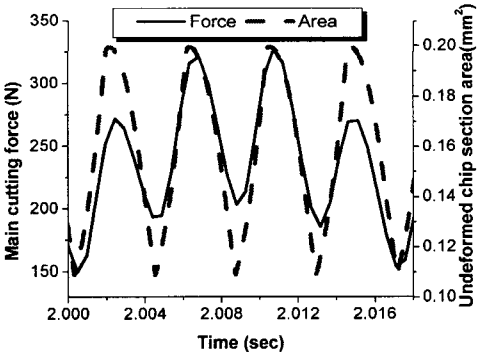
4. 수정 미변형칩 단면적의 결정

4.1 공구 런아웃의 영향을 배제한 이상적인 미변형칩 단면적의 변화

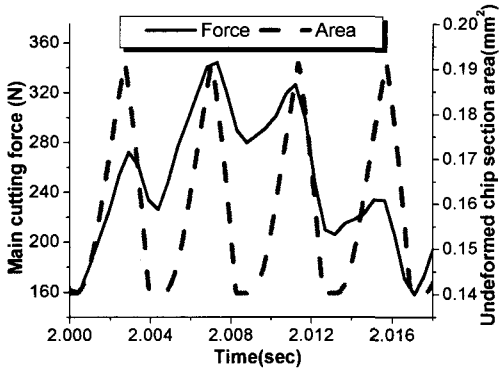
Fig. 6(a), (b) 및 (c)는 공구 형상과 절삭조건에 의해 계산되는 이상적인 미변형칩단면적(Fig. 5)과 공구동력계로부터 측정된 절삭력 성분중 주절삭력 성분 F_y를 각 주기의 최대값 및 최저값을 쉽게 찾을 수 있도록 500Hz low pass filter로 여과하여 함께 나타낸 것이다.



(a) Helix angle 30°



(b) Helix angle 40°



(c) Helix angle 50°

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

절삭력과 절삭에 참여하는 미변형칩단면적이 비례관계에 있다고 가정하면, 이상적인 경우 획득된 절삭력의 주기와 변동 진폭이 일정한 절삭력을 상정할 수 있다.

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 절삭단면적사이에 불가피하게 존재하는 차이에 기인한 것으로 추정된다.

Kline 과 Devor[4]는 이와 같은 차이가 주로 머시닝센타에서 공구홀더 중심과 엔드밀 중심의 불일치로 인해 발생하는 편심에 따른 런아웃에 기인한다고 보고한 바있다.

4.2 공구 런아웃의 영향을 고려한 미변형칩 단면적의 변화

본 논문에서는 수정 미변형칩 단면적을 결정하기 위하여 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 측정절삭력 중 한 주기에서 나타나는 4개의 peak값과 4개의 valley값의 평균값을 구한후, 이들 평균값과 각각의 peak값과 valley값과의 차이를 구하였다. 이렇게 구해진 절삭력의 차이가 그 순간의 미변형칩 단면적 차이에 비례한다는 가정하에 수정 미변형칩 단면적을 결정하였다.

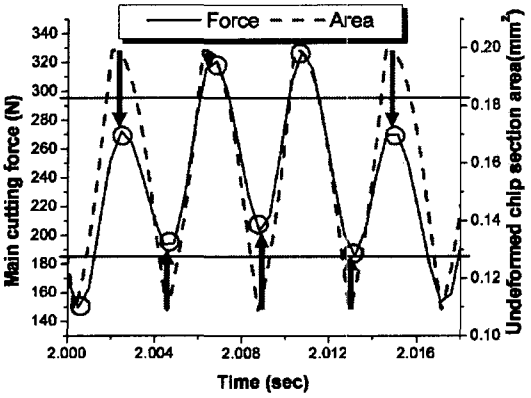
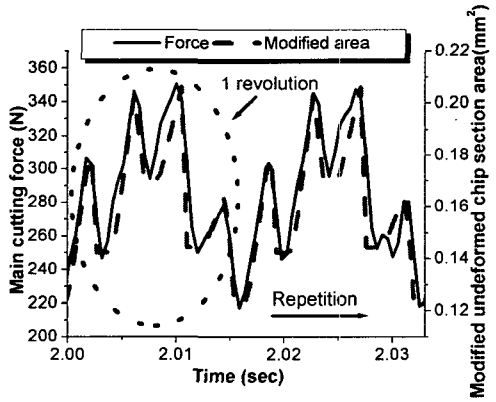
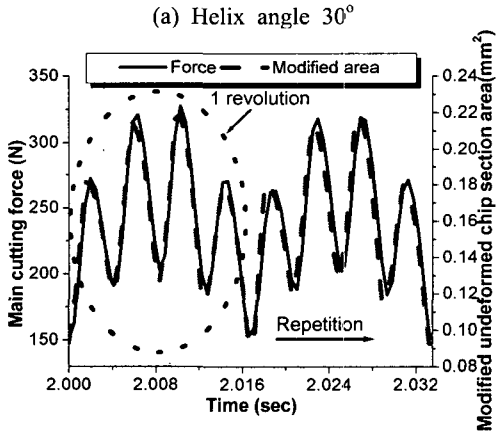


Fig. 7 Determination of Modified undeformed chip section area (mm^2)

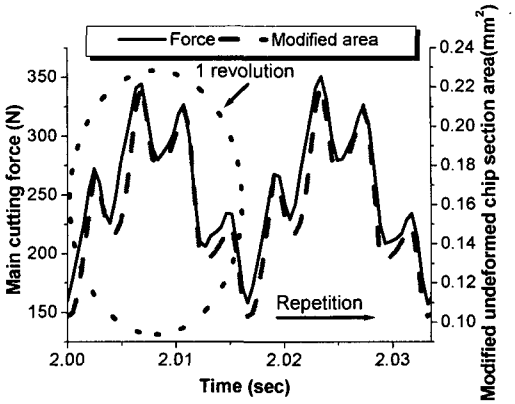
Fig. 8은 상기한 방법으로 구한 수정 미변형칩 단면적과 실험에서 측정된 절삭력을 함께 나타낸 것이다.



(a) Helix angle 30°



(b) Helix angle 40°



(c) H.A. 50°

Fig. 8 Modified undeformed chip section area (mm^2) 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.

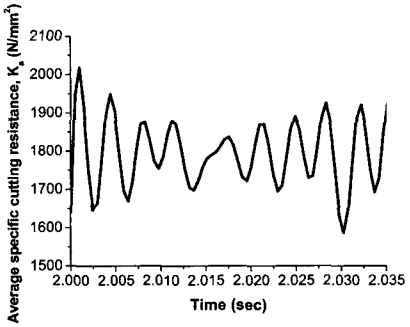
Table 3은 본 논문에서 결정한 수정 미변형칩 단면적값들 나타낸 것이다.

Table 3 Modified undeformed chip section area (mm^2) depending on helix angle (°)

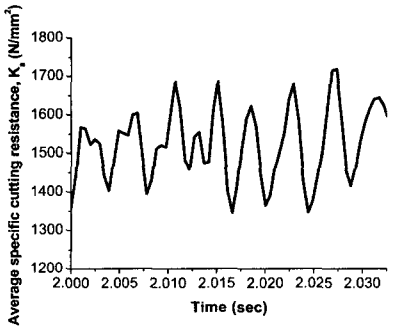
Helix angle	30	40	50
Max.	0.2062	0.2186	0.2208
Min.	0.1227	0.0929	0.1031
Avg.	0.1600	0.1587	0.1594

표에서 보는 바와 같이 수정 미변형칩 단면적의 평균값은 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각이 50°에서 다시 증가하고 있으나 그 차이는 미미하게 나타나고 있다.

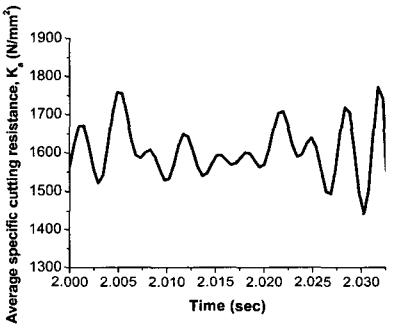
Fig. 9는 측정된 주절삭력 성분을 수정 미변형칩 단면적으로 나누어 구해지는 평균비절삭저항 K_a를 나타낸 것으로, 비교적 큰 값의 변화를 나타내고 있다.



(a) Helix angle 30°



(b) Helix angle 40°



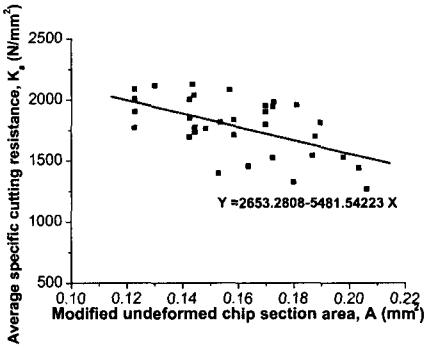
(c) Helix angle 50°

Fig. 9 Averagespecific cutting resistance (N/mm^2) depending on cutting time (sec)

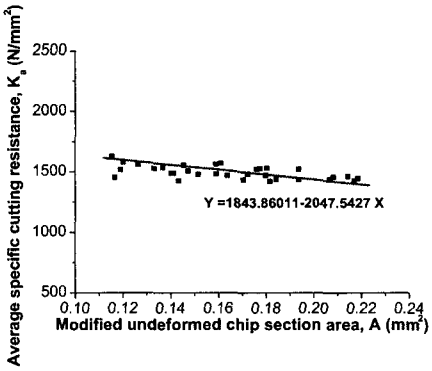
Table 4 Average specific cutting resistance depending on helix angle

Helix angle (°)		30	40	50
K_a (N/mm^2)	Max.	2081.531	1717.211	1770.513
	Min.	1586.173	1346.561	1442.222
	Avg.	1795.703	1521.468	1605.585

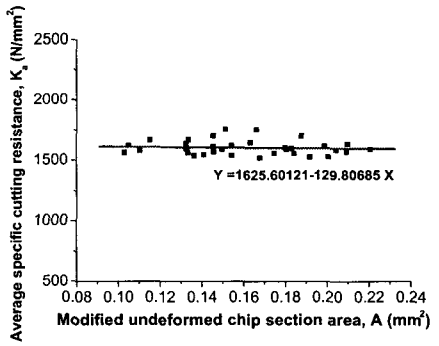
Table 4는 평균비절삭저항 K_a를 헬릭스각도에 따라 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 평균비절삭저항 K_a는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각이 50°에서 다시 증가하고 있다.



(a) Helix angle 30°



(b) Helix angle 40°



(c) Helix angle 50°

Fig. 10 Modified undeformed chip section area, A(mm^2) vs. average sepcific cutting resistance (N/mm^2)

Fig. 10은 Fig. 9의 자료를 사용하여 수정 미변형칩 단면적 크기에 따른 평균비절삭저항 K_a의 변화특성을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 평균비절삭저항 K_a는 수정 미변형칩 단면적이 커짐에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있으며, 헬릭스각이 작아질수록 이 경향은 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 절삭에서의 치수효과[7]에 기인한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 엔드밀링시 한 개의 절삭날에 의해 제거되는 미변형칩 단면(端面)과 등가인 삼각형을 도입하여 절삭시간에 따라 주기적으로 변화하는 이상적인 미변형칩 단면적(斷面積)을 구하였다.

또한 측정된 주절삭력 성분을 이용하여 공구 런아웃을 고려한 수정 미변형칩 단면적을 정의하고, 이를 이용하여 평균비절삭저항 K_a를 구하였다.

평균비절삭저항 K_a는 헬릭스각 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 증가하였다.

또한 평균비절삭저항 K_a는 수정 미변형칩 단면적이 커짐에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있으며 헬릭스각이 작아질수록 이 경향은 크게 나타나고 있다.

참고문헌

1. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of the ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
2. "Accuracy of Milled Surfaces. Part 1 : Effect of Cutter Diameter, Number of Teeth, Runout and Feed," Metal Cuttings, Vol. 9, No. 1, Jan. 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. Kline, W. A. and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23 No. 2/3, pp. 123-140, 1983.
5. 이영문, 이선호, 태원익, 권오진, 최봉환, "인코넬 718의 상향 및 하향 엔드밀링시 헬릭스각에 따른 절삭력 변화," 한국정밀공학회지, 제18권, 제7호, pp. 143-148, 2001.
6. 이영문, 송태성, 심보경, "엔드밀링의 전단특성 및 마찰특성해석," 대한기계학회논문집 A권, 제25권, 제10호, pp. 1520-1527, 2001.
7. Shaw, M. C., and Finnie, I.,"The Shear Stress in Metal Cutting," Trans. of the ASME, Vol. 77, pp. 115-125, 1955.