

엔드밀링 공정의 형상창성기구에 의하여 절삭면적이 측벽 진직도 특성에 미치는 영향

김 강^{*†}

* 국민대학교 기계시스템공학부

Effects of Cutting Area on Straightness Characteristics in Side Walls Caused by Form Generation Mechanism in End-Milling Process

Kang Kim^{*†}

* School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin Univ.

(Received June 10, 2013 ; Revised July 9, 2013 ; Accepted July 23, 2013)

Key Words: End-Milling Process(엔드밀링 공정), Form Generation Mechanism(형상창성기구), Straightness Characteristics(진직도 특성), Side Walls(측벽), Cutting Area(절삭면적), Thrust Force(배분력)

초록: 엔드밀링 공정은 형상창성기구의 특성 상, 절삭면적의 주기적인 변화를 피할 수 없다. 그러므로, 본 연구에서는, 가공 중 절삭날과 공작물 사이의 간섭영역에 해당하는 절삭면적의 모델을 확립하여, 가공면 형상 특성과 절삭면적의 관계를 규명하고자 한다. 대상 가공면은 측벽을 선정하였으며, 형상 특성은 축 방향 진직도를 선정하였다. 절삭면적 및 축방향 진직도에 영향을 미치는 특이점 추정 모델의 타당성은 반경 방향 및 축 방향 절삭깊이를 변화시키며 엔드밀링 가공을 수행하여 검증하였다. 연구 결과, 배분력이 음의 값을 갖지 않는 안정적인 엔드밀링 가공의 경우, 상향절삭은 절삭면적이 증가했다 일정해지는 영역에서, 하향절삭은 절삭면적이 일정했다 감소하는 영역에서 가공면을 창성하며, 영역이 변화될 때 가공면에 특이점이 발생하는 것이 확인되었다.

Abstract: The cutting area changes periodically in the end-milling process because of its form generation mechanism. In this study, the effects of the cutting area on end-milled side walls are studied by developing a cutting area model that simulates the area formed by engagement between a workpiece and a cutting edge of the end mill. To do this, the straightness profile of the side wall in the axial direction is investigated. Models for estimating the cutting area and the transition point, where the slope of the straightness profile changes suddenly, are verified from real end-milling experiments under various radial and axial depth of cut conditions. Through this study, it is confirmed that the final end-milled side wall is generated in the regions where cutting areas are constant and decreasing in the down-cut. Similarly, in stable up-cut, it is also generated in the regions where cutting areas are increasing and constant. It is found that the transition point appears when the region changes.

1. 서 론

기술 발전 및 제품에 대한 소비자의 요구 사항 변화에 따라 전통적인 기계공작법에 대한 관심이 과거에 비하여 상대적으로 낮은 경향이 있다. 그러나, 핵심 부품의 표준화에 따른 성능 및 기능,

가격 측면에서의 차이가 적어짐에 따라, 제품 경쟁력에 있어서의 외양디자인 및 이의 제작과 관련된 금형기술의 중요성이 점차 커지고 있다. 따라서, 금형 제작에 보편적으로 활용되는 엔드밀링가공 특성에 대한 연구가 다시금 요구되고 있다.

현재까지 엔드밀링 가공 특성과 관련하여, 다양한 가공 변수가 가공면에 미치는 영향을 정적 및 동적으로 분석하는 연구가 많이 진행되었으며, 이를 바탕으로 가공 정밀도 향상을 위한 가공 조건에 대한 연구도 수행되었다.^(1~12) 이와 관련된 대부

† Corresponding Author, kangkim@kookmin.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

본의 연구에서는 절삭력이 매개변수로 활용되었다. 이 절삭력은 절삭면적과 밀접한 관계가 있는데, 모든 가공 조건이 일정하게 유지되는 경우에도, 다인 공구를 사용하는 밀링 가공은 단인 공구를 사용하는 선삭 가공과 달리 가공 중에 주기적으로 절삭면적이 변하는 것을 피할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 엔드밀링 가공된 가공면이 생성되는 과정 중, 공구가 회전함에 따라 순간 순간의 날과 공작물의 상대적인 위치에 의하여 형성되는 기하학적 간섭면적을 해석적으로 구하여 절삭면적의 모델로 제시하고자 한다. 이 절삭면적의 변화가 절삭력 및 가공면의 형상에 미치는 영향에 대하여 고찰하고, 이를 통하여 엔드밀링 가공 시 형상 생성기구에 의하여 측벽 가공면에 필연적으로 발생하는 축 방향 진직도 형상 특성에 대하여 살펴 보고자 한다.

2. 모델링

2.1 가정

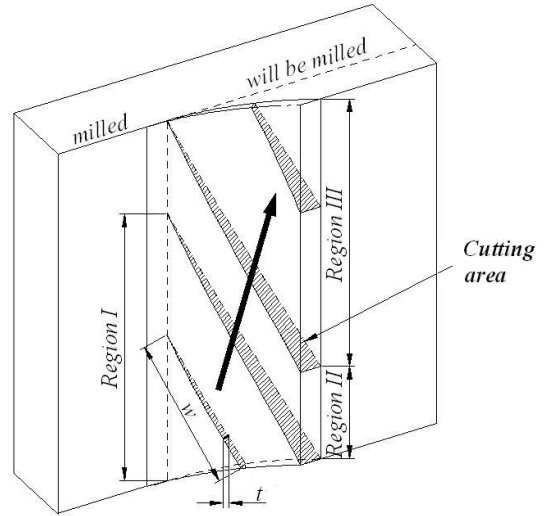
가공 중 발생하는 탄성변형량은 소재제거량에 비하여 상대적으로 작으므로, 절삭면적 모델을 확립함에 있어서 가공탄성의 영향은 무시하였다. 따라서, 절삭날과 공작물 간의 기하학적 간섭이 이루어지는 부분은 모두 절삭면적에 해당하는 것으로 간주하였다. 아울러, 공구가 공작물에 진입 혹은 퇴출하는 구간을 제외한 정상상태 가공 구간만을 고려함으로써, 이송 방향으로의 가공형상 변화는 없는 것으로 가정하였다. 이를 바탕으로, 절삭면적의 변화가 축 방향 진직도 특성에 미치는 영향을 추정하는 모델을 확립하였다.

2.2 절삭면적

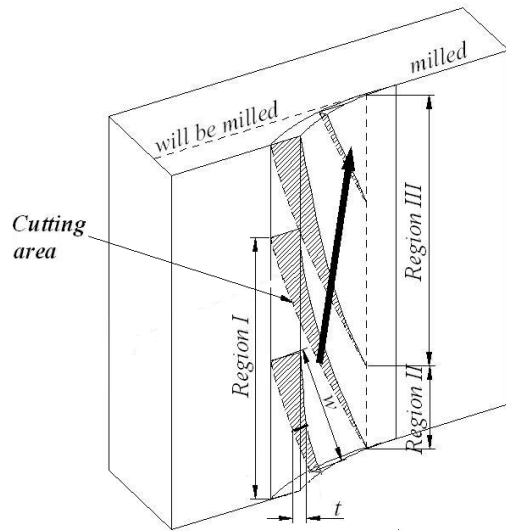
엔드밀을 이용한 절삭가공에서는, Fig. 1 을 통해 확인할 수 있듯이, 비틀림각(β)의 영향으로, 절삭 폭(w)과 미변형칩 두께(t)는 모두 절삭날의 위치에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 엔드밀 가공에서의 미변형칩 두께는 식 (1)과 같이 날 당 이송거리(f_t)와 미소날의 위치각(θ)의 함수로 쓰여 진다.

$$t = f_t \sin \theta \quad (1)$$

이때 미소날의 위치각은, Fig. 2 에서 볼 수 있듯이, 가공면의 법선을 기준으로 공구의 회전방향울 양의 방향으로 잡았다. θ_{upper} 와 θ_{lower} 는 가공면울 기준으로 절삭에 참여하는 미소날의 위쪽과 아래



(a) Up cut



(b) Down cut

Fig. 1 Cutting area

쪽의 위치각을 뜻한다. 또한 절삭에 참여하고 있는 절삭날의 미소길이(dw)는 비틀림각과 공구반경(r)의 함수로 식 (2)와 같다.

$$dw = \frac{r d\theta}{\sin \beta} \quad (2)$$

따라서, 절삭면적(A_c)은 미변형칩 두께와 절삭날 길이의 곱으로 표현되는 미소면적을 접촉 구간에 대하여 적분하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_c = \frac{r f_t}{\sin \beta} \int_{\theta_{lower}}^{\theta_{upper}} \sin \theta d\theta \quad (3)$$

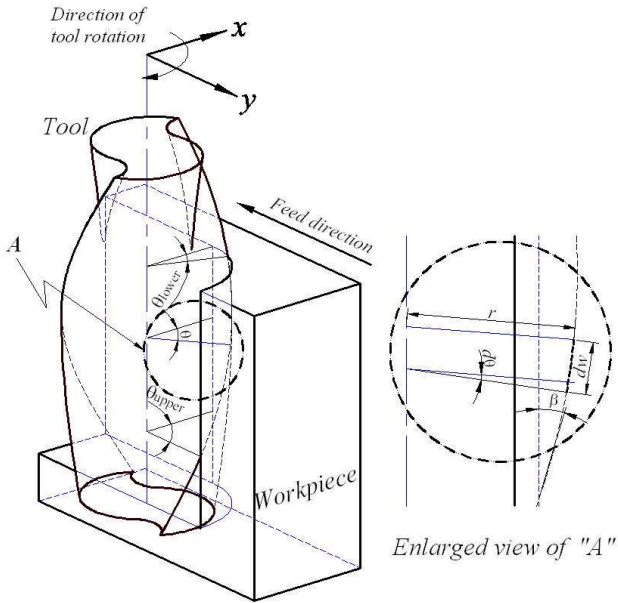


Fig. 2 Coordinate system for flat end mill

2.3 절삭면적 변화

칩의 미변형 두께에 해당하는 절삭면적은 절삭날이 공작물과 접촉을 시작해서 이탈하는 과정 중에 계속 변화된다. Fig. 1 에서 볼 수 있듯이, 절삭날이 공작물과 접촉하는 순간부터 1 영역에 위치하는 동안은 절삭면적이 증가한다. 그러나, 2 영역에서는 절삭면적이 일정하게 유지되다가 3 영역에 진입한 후부터 절삭날이 공작물을 벗어나는 순간까지는 절삭면적이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 각각의 영역을 절삭날의 각변위로 나타내어 정리한 내용은 Table 1 과 같다. 이 표에서 ψ 는 절삭날 끝의 각변위를 의미하며, α 와 ϕ 는 각각 공구와 공작물이 접해있는 원호의 각과 축 방향 절삭깊이에 해당하는 공구 회전각을 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1}(1 - \frac{R_d}{r}) \quad (4)$$

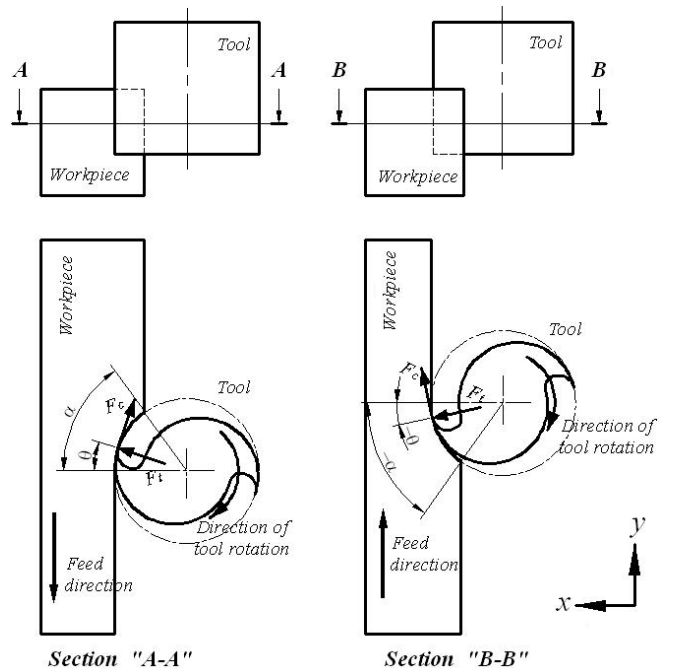
$$\phi = \frac{A_d \tan \beta}{r} \quad (5)$$

여기에서 R_d 와 A_d 는 각각 반경 방향 절삭깊이와 축 방향 절삭깊이를 의미한다.

Fig. 1 과 3 에서 볼 수 있듯이, 상향절삭 시 1 영역에서 절삭날의 θ_{lower} 는 0 으로 일정하고 θ_{upper} 만 0 에서부터 α 까지 증가한다. 2 영역에서는 θ_{upper} , θ_{lower} 가 각각 α 와 0 으로 하상 일정하다. 또한, 3 영역에서 θ_{upper} 는 α 로 일정하지만 θ_{lower} 는 0

Table 1 Limits of angular displacement

		Region		
		I	II	III
Cutting area change		Increase	Constant	Decrease
Up cut	ψ	$0 \sim \alpha$	$\alpha \sim \phi$	$\phi \sim \phi + \alpha$
	θ_{lower}	0	0	$\psi - \phi$
	θ_{upper}	ψ	α	α
Down cut	ψ	$-\alpha \sim 0$	$0 \sim \phi - \alpha$	$\phi - \alpha \sim \phi$
	θ_{lower}	ψ	0	0
	θ_{upper}	$-\alpha$	$-\alpha$	$\psi - \phi$



(c) Up cut

(d) Down cut

Fig. 3 Coordinate system and force in end milling

에서부터 α 까지 증가한다. 반면에 하향절삭 시에는, Fig. 3 에 나타난 좌표 설정에 따라, 절삭날이 1 영역에 존재할 때 θ_{upper} 는 $-\alpha$ 가 되고 θ_{lower} 는 $-\alpha$ 에서 0 으로 증가하며, 2 영역에서 θ_{upper} , θ_{lower} 는 각각 $-\alpha$ 와 0 으로 일정하다. 아울러, 3 영역에서는 θ_{lower} 는 0 이 되며 θ_{upper} 가 $-\alpha$ 에서 0 으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 엔드밀링에 의하여 한 개의 칩이 생성될 때 절삭력이 일정한 주기로 증가-일정-감소할 것으로 예상된다.

2.4 절삭면적 변화 위치와 최종 가공면 진직도

모든 최종 가공면은, Fig. 3 에서 볼 수 있듯이, 각변위가 0 인 위치에 있는 미소날에 의해서만 생성된다. 즉, 상향절삭에서는 날이 공작물과 접할 때부터 절삭면적이 일정할 때까지인 1 과 2 영역에서만 최종 가공면이 생성되고, 절삭면적이 감소하는 구간인 3 영역에서 생성되는 가공면은 이어지는 절삭날에 의하여 제거되므로 최종 가공면을 생성하지 않는다. 반면에 하향절삭에는 절삭면적이 증가하는 1 영역에서는 최종 가공면이 생성되지 않으며, 절삭면적이 일정한 구간에서부터 감소할 때까지인 2 와 3 영역에서만 최종 가공면이 생성된다.

절삭면적이 일정한 2 영역이 존재하기 위해서는 식(3)에서 θ_{upper} 와 θ_{lower} 의 사이각 α 가 존재해야 하므로, Fig. 3 에서 볼 수 있듯이, 축 방향 절삭깊이는 아래의 식을 만족해야 한다.

$$A_d \geq \frac{r\alpha}{\tan \beta} \quad (6)$$

식(6)을 만족하여 2 영역이 존재하는 경우, 절삭면적의 급격한 변화는 상향, 하향절삭에 있어서 각각 1 에서 2 영역으로 전환되는 순간, 2 에서 3 영역으로 전환되는 순간에 발생된다. 그러므로 이 순간에 절삭력의 급격한 변화가 발생할 것으로 예상되며, 아울러 이 순간에 최종 가공면이 생성되는 축 방향 위치에서 진직도 특성의 변화가 나타날 것으로 추정된다. 진직도 특성이 변화되는 위치는, Fig. 1 에서 볼 수 있듯이, 상향절삭의 경우에는 1 영역의 최종 위치와 일치하며, 하향절삭의 경우에는 3 영역의 시작 위치와 일치할 것으로 예상된다. 따라서, 공구 끝을 기준으로 하여 진직도 특성이 변화되는 위치를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$(z_{cs})_{Up} = \frac{r\alpha}{\tan \beta} \quad (7)$$

$$(z_{cs})_{Down} = A_d - \frac{r\alpha}{\tan \beta} \quad (8)$$

여기에서, $(z_{cs})_{Up}$ 및 $(z_{cs})_{Down}$ 은 각각 상향절삭 및 하향절삭 시 진직도 특성의 변화 위치를 의미한다.

엔드밀링 가공 시 축 방향 절삭깊이는 반경 방향 절삭깊이 보다 큰 것이 일반적이다. 그러나 R_d / A_d 가 상대적으로 큰 값을 나타내는 경우에는 2 영역이 존재하지 않으나 최종 가공면의 생성 중에 영역이

변화되지 않는다. 따라서, 절삭방향과 무관하게 진직도 특성이 변화되는 위치가 존재하지 않을 것으로 추정된다.

3. 실험

3.1 시편, 공구 및 실험 장비

본 실험에서는 시편 재료는 기계구조용 탄소강 SM45C 를 사용하였으며, 시편 형상은 Fig. 4 와 같다. 모든 시편은 위치에 따른 반경 방향 절삭깊이를 일정하게 유지하고 정확한 측정을 위하여 실험 전에 가공면을 연삭하였다. 엔드밀링 작업에는 통일중공업의 수직 형 CNC 밀링머신 TMV-40M 기종을 이용하였으며, 실험에 사용된 절삭공구는 내마모성과 내용착성이 우수한 OSG 사의 TiCN 코팅 처리된 HSS 엔드밀(두 날, 표준 비틀림각 30°)을 사용하였다. 실험의 신뢰성을 높이기 위해 시편을 18 개 가공 후에는 새 공구로 교환하였다.

절삭력은 AMTI 사의 MC818 공구동력계와 DSA-6 디지털 앰프를 사용하였으며, 가공면의 진직도는 Taylor Hobson 사의 Talysurf Series2 로 측정하였다. 진직도 측정은 가공면의 중앙에서 하단으로부터 2mm 떨어진 지점으로부터 윗쪽으로 실시하였다.

3.2 절삭방향과 반경 방향 절삭 깊이 실험

절삭방향과 반경 방향 절삭깊이가 가공형상에 미치는 영향에 대해 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 절삭날 당 이송거리와 축 방향 절삭깊이는 0.1mm/tooth, 20mm 로 동일하게 하였으며, 직경이 20mm 인 공구를 사용하였다. Table 2 에서 볼 수 있듯이, 반경 방향 절삭깊이는 0.1, 0.5, 1.0, 1.5mm 로

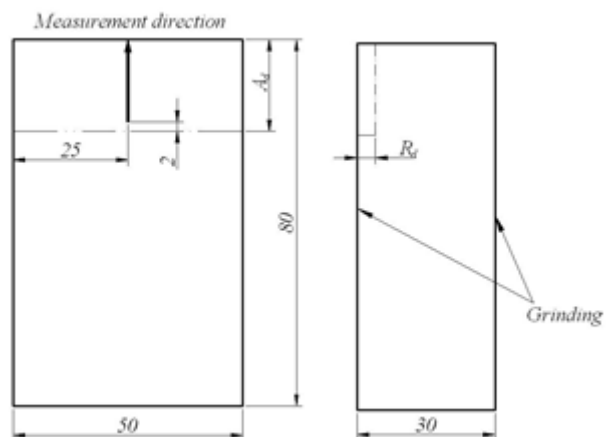


Fig. 4 Specimen

Table 2 Conditions for the experiment of cut direction and radial depth of cut

Conditions	Value
Spindle speed (rpm)	300
Feed rate (mm/min)	60
Feed per tooth (mm/tooth)	0.1
Axial depth of cut (mm)	20
Radial depth of cut (mm)	0.1, 0.5, 1.0, 1.5
Tool diameter (mm)	20
Helix angle (°)	30
Number of teeth	2
Cut direction	Up & Down cut

Table 3 Conditions for the experiment of axial depth of cut

Conditions	Value
Spindle speed (rpm)	360
Feed rate (mm/min)	65
Feed per tooth (mm/tooth)	0.09
Axial depth of cut (mm)	5, 10, 15, 20
Radial depth of cut (mm)	1.0
Tool diameter (mm)	20
Helix angle (°)	30
Number of teeth	2
Cut direction	Down cut

변화를 주었으며, 각각의 반경 방향 절삭깊이에 대하여 상향과 하향절삭을 실시하였다.

3.3 축 방향 절삭 깊이 실험

축 방향 절삭 깊이가 가공형상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Table 3 에서 제시한 조건으로 실험을 실시하였다. 축 방향 절삭깊이를 5, 10, 15, 20mm 로 변화시키면서 다른 절삭조건은 동일하게 유지하며 실험하였다. 공구는 직경 20mm 인 엔드밀을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

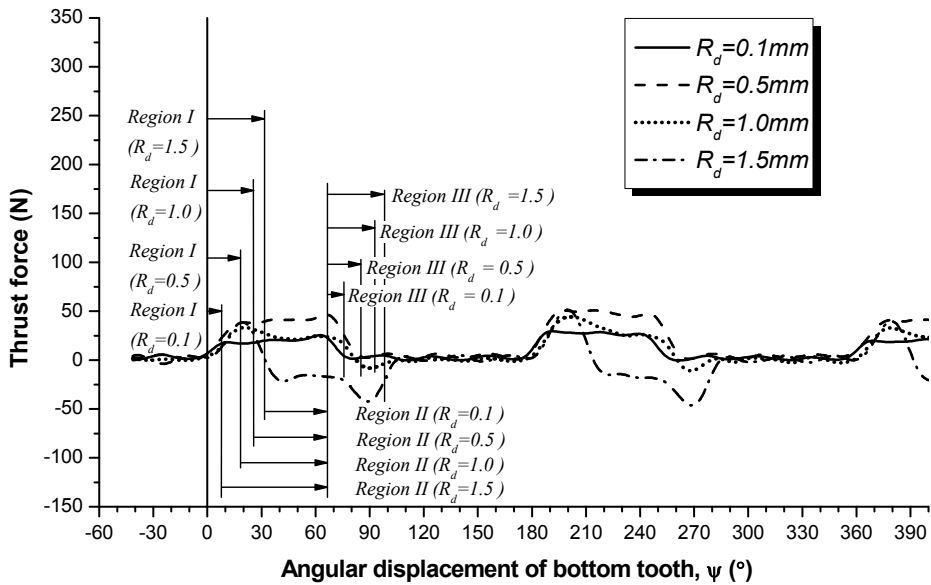
4.1 절삭방향과 반경 방향 절삭깊이의 영향

Fig. 5 는 반경 방향 절삭깊이 변화에 따라 공구

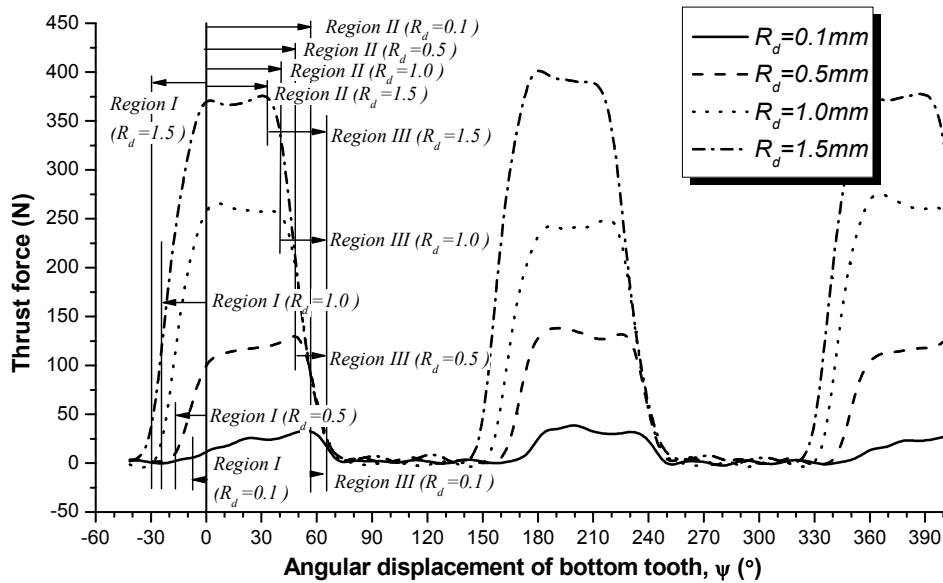
에 작용하는 배분력 변화를 상향절삭과 하향절삭을 각각 수행하며 측정된 결과이다. Fig. 3 에 나타난 것과 같이, 절삭 중의 미소날은 공작물에 주분력(F_c)와 배분력(F_f)을 작용시킨다. 이 때 절삭날 상의 모든 미소날들은, Fig. 6 에서와 같이 축 방향 위치에 따라 공작물에 서로 다른 방향으로 주분력과 배분력을 작용시킨다. 아울러, 모든 미소날에 작용하는 주분력과 배분력을 합한 합력의 y 축 방향 분력과 x 축 방향 분력은 각각 공구가 공작물에 작용하는 주분력과 배분력을 의미한다. 가공면의 축 방향 진직도는 주분력보다 배분력의 영향을 크게 받는다. 그러므로, 본 연구에서는 절삭력의 x 축 방향 분력인 배분력을 측정하였다. Fig. 5 에 표시한 1, 2, 3 영역은, 해당 실험 조건을 Fig. 1 과 3 에 적용하여 해석적으로 구한 값으로 구분되었다.

상향절삭의 경우, 절삭깊이가 0.1mm 일 때에는, 해석적으로 추정된 절삭면적의 증가(1 영역)-일정(2 영역)-감소(3 영역) 경향 및 위치가 실험을 통하여 측정된 배분력의 변화 경향 및 위치와 동일한 것이 확인되었다. 그러나, 절삭깊이가 0.5mm 로 증가하면 전반적인 변화 경향 및 1 영역에서 2 영역으로 변화하는 위치는 추정 결과와 실험 결과가 일치하지만, 2 영역에서 3 영역으로 변화하는 위치는 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이러한 차이는 절삭깊이가 증가할수록 더 심화되어, 절삭깊이가 1.0, 1.5mm 인 경우에는 2, 3 영역의 변화 위치뿐만 아니라 1, 2 영역의 변화 위치에서도 차이가 나타나며 그 차이 또한 커지는 것이 확인되었다. 이 차이는 배분력의 방향이 바뀌어 음의 값이 되는 것과 관계가 있는 것으로 추정된다. Fig. 6 에서 공구의 회전에 따라 실제적인 절삭깊이가 증가하면 합력의 x 축 방향 분력인 배분력이 음의 값이 될 수 있으며, 이 현상은 Fig. 5(a)에서도 확인할 수 있다. 따라서 배분력이 음의 값을 가지면, 절삭면적의 변화에 근거하여 절삭력 변화 경향을 추정하는 것은 어려움이 있다고 판단된다. 그러나, 이미 알려진 바와 같이 배분력이 음의 값이 되면 절삭작업이 불안정해 질 수 있으며, 이 불안정은 가공면의 창성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ 그러므로 정상적인 절삭작업에서는 배분력이 음의 값이 되는 절삭조건은 지양하는 것이 일반적이다.

Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이, 하향절삭의 경우 모든 실험에서 음의 배분력은 발생하지 않았다. 실험 오차를 감안할 때, 해석적으로 추정된 절삭면적의 변화 경향 및 위치가 실험을 통하여 측정된



(a) Up cut



(b) Down cut

Fig. 5 Effect of cut direction and radial depth of cut on thrust force

배분력의 변화 경향 및 위치와 동일하게 나타났으며, 특히 하향가공 시 절삭날이 가공면을 창성하는 2, 3 영역에 있어서는 모든 실험 결과가 추정결과와 정확히 일치되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7 은 본 실험을 통하여 가공된 가공면의 축방향 형상을 보여주고 있다. 식 (7), (8)을 이용하여, 절삭면적의 변화를 바탕으로, 해석적으로 추정된 가공면 축 방향 형상의 급격한 변화 위치(z_{cs})

를 이 그림에 표시하였다. 상향절삭의 경우, 반경방향 절삭깊이가 0.1, 0.5, 1.0, 1.5mm 로 증가함에 따라 추정된 위치는 각각 2.45, 5.50, 7.81, 9.61mm 로 계산되었으며 이 위치는 공구 끝에서 위로 이동하는 것으로 예측되었다. 그러나, 실험을 통하여 측정된 위치는 각각 2.0, 5.4, 5.6, 5.7mm 로 확인되어, 절삭깊이가 1.0, 1.5mm 로 증가하면 추정과 실험 결과가 일치하지 않을 뿐만 아니라, 과절삭이

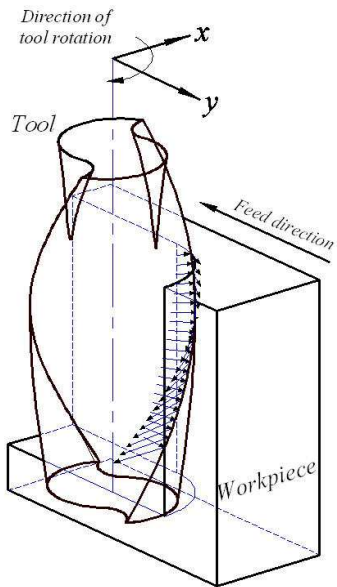
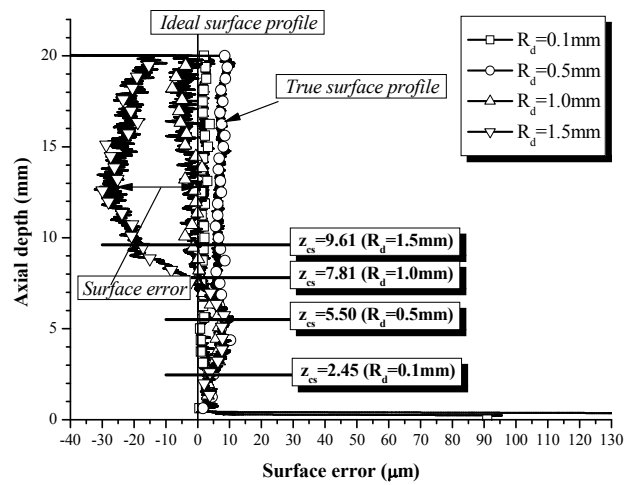


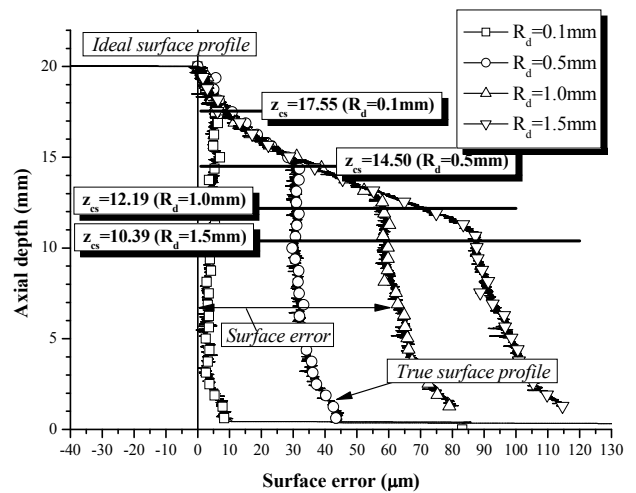
Fig. 6 Distribution of cutting force (Up cut)

발생하여 공작물과 공구의 기하학적인 간섭이 있는 부분보다 더 깊게 제거되는 경향을 보인다. 이 경향은, 앞선 절삭력 측정 결과와 마찬가지로, 음의 배분력 발생에서 기인한 불안정한 절삭작업의 결과로 추정된다. 하향절삭의 경우에는, 상향절삭과 동일하게 반경 방향 절삭깊이를 증가 시, 추정 위치는 각각 17.55, 14.50, 12.19, 10.39mm, 측정 위치는 각각 17.8, 14.8, 12.4, 10.7mm 임을 알 수 있다. 상향절삭과 비교하여 볼 때 이 위치는, 상향절삭과는 반대로 공구 끝을 향하여 이동하는 것으로 나타났으며, 추정과 실험 결과가 상대적으로 더욱 잘 일치되는 것을 보여준다.

절삭날의 회전에 따라 절삭면적은 1, 2, 3 영역에서 증가-일정-감소를 반복하며, 절삭깊이가 변하면 1, 3 영역은 각각 해당 구간의 크기만 변하고 절삭면적 변화 경향은 각각 동일하게 유지된다. 따라서, 하향절삭 시 3 영역에서 창성되는 가공면의 측방향 형상(Fig. 7(b)에서 z_{cs} 위 부분에 해당)은 반경 방향 절삭깊이가 증가하면 궤적이 연장될 뿐 궤적의 변화 경향은 동일한 것을 볼 수 있다. 상향절삭의 경우, 음의 배분력 발생에 의한 영향을 감안하면, 1 영역에서 창성되는 가공면(Fig. 7(a)에서 z_{cs} 아래 부분에 해당)도 유사한 경향을 나타내고 볼 수 있다. 아울러, 배분력이 양인 경우, 절삭면적이 일정한 2 영역에서 창성되는 가공면의 측방향 형상(상향절삭은 Fig. 7(a)에서 z_{cs} 위 부분, 하향절삭은 Fig. 7(b)에서 z_{cs} 아래 부분)의 기울기는 각각 상향절삭은 1 영역, 하향절삭은 3 영역에서



(a) Up cut



(b) Down cut

Fig. 7 Effect of cut direction and radial depth of cut on straightness profile

창성된 형상보다 이상적인 가공면과 평행도가 높은 특성을 나타낸다. 또한 절삭면적은 상향절삭의 경우 절삭이 시작될 때 최소가 되고, 하향절삭에서는 절삭이 끝날 때 최소가 된다. 그러므로 가공면 오차도 상향절삭에서는 아래쪽의 가공면이 최소가 되며 하향절삭에서는 위쪽의 가공면이 최소가 되는 것도 볼 수 있다.

결과를 종합해 볼 때, 음의 배분력이 발생하지 않는 안정적인 절삭작업의 경우, 상향절삭은 1, 2 영역에서, 하향절삭은 2, 3 영역에서 가공면의 창성이 이루어지는 것을 알 수 있는데, 이는 일반적인 정상 조건에서 형상 오차는 상향가공의 절삭초기에 하향가공의 절삭후반부에 결정된다는 류시형의

연구 결과와 일치한다.⁽¹¹⁾ 따라서, 절삭면적의 변화를 통하여, 가공면의 기울기 및 급격한 기울기 변화 위치와 같은 가공면의 진직도 특성 추정이 가능하다고 판단된다.

4.2 축 방향 절삭깊이의 영향

축 방향 절삭깊이가 가공형상에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 배분력이 양의 값을 가지는 안정적인 절삭작업을 유지하기 위하여 하향절삭만을 수행하였다.

Fig. 8 은 축 방향 절삭 깊이에 따른 배분력 변화를 보여주고 있다. 축 방향 절삭깊이가 7.8mm 이상이면 식 (6)을 만족하므로, 축 방향 절삭깊이가 증가하여도 3 영역에 도달하기 전까지는 절삭면적이 일정하게 유지되고, 해당 배분력 최대값은 큰 변화가 없을 것으로 예상된다. 축 방향 절삭깊이가 7.8mm 이상인 경우, 주어진 실험조건을 활용하여 계산된 최대 절삭면적은 0.18mm²로 일정하며, Fig. 8 의 실험 결과에 의하면, 축 방향 절삭깊이가 10mm 이상인 경우 최대 배분력은 200~210N으로 상대적으로 변화가 적은 것을 볼 수 있다.

상대적으로 배분력 변화가 적은 구간인 2 영역의 크기는 축 방향 절삭 깊이가 10, 15, 20mm로 증가할수록 해당 공구회전각이 7, 24, 40°로 증가하는 것과, 배분력이 각각 증가, 감소하는 구간인 1 영역과 3 영역의 범위는 일정하게 공구회전각 26°

상에 해당하는 것도 확인할 수 있다. 그러나 축 방향 절삭깊이가 5mm 인 경우에는 식 (6)의 부등식을 만족하지 않으므로 절삭가공 중 절삭면적이 일정한 구간이 존재하지 않으며, -9°에서부터 절삭면적이 감소하기 시작한다. 이는 가공면이 절삭면적 감소 구간인 3 영역에서만 생성된다는 것을 의미한다.

Fig. 9 는 축 방향 절삭깊이의 변화에 따른 가공면의 축 방향 형상 변화를 보여주고 있다. 축 방향 절삭깊이가 10mm 인 경우 식 (8)에서 정의한 가공면의 기울기가 급격히 변하는 위치(2 영역과 3 영역의 경계)는 2.19mm로 실험 결과인 2mm와 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 축 방향 절삭깊이가 15, 20mm 인 경우에도 가공면의 기울기가 급격히 변하는 위치(z_{cs})의 추정값은 각각 7.19, 12.19mm로 실험에 의한 측정값 7, 12mm와 일치하는 것으로 보인다. 최종 가공면의 축 방향 위치 z_{cs} 까지는 절삭면적이 일정한 2 영역에서 가공면이 생성되며, z_{cs} 이후에는 절삭면적이 감소되는 3 영역에서 가공면이 생성되었다. 축 방향 절삭깊이에 따른 3 영역의 시작 위치 및 가공면 오차가 서로 다를지라도, z_{cs} 전후의 축 방향 가공면 기울기는 각각 동일한 양상을 띤다. 아울러, 가공면의 급격한 기울기 변화 위치를 계산하여 추정한 값들의 차이는 각각의 값에 해당하는 축 방향 절삭깊이의 차이와 정확히 일치한다. 이를 바탕으로 Fig. 9 에

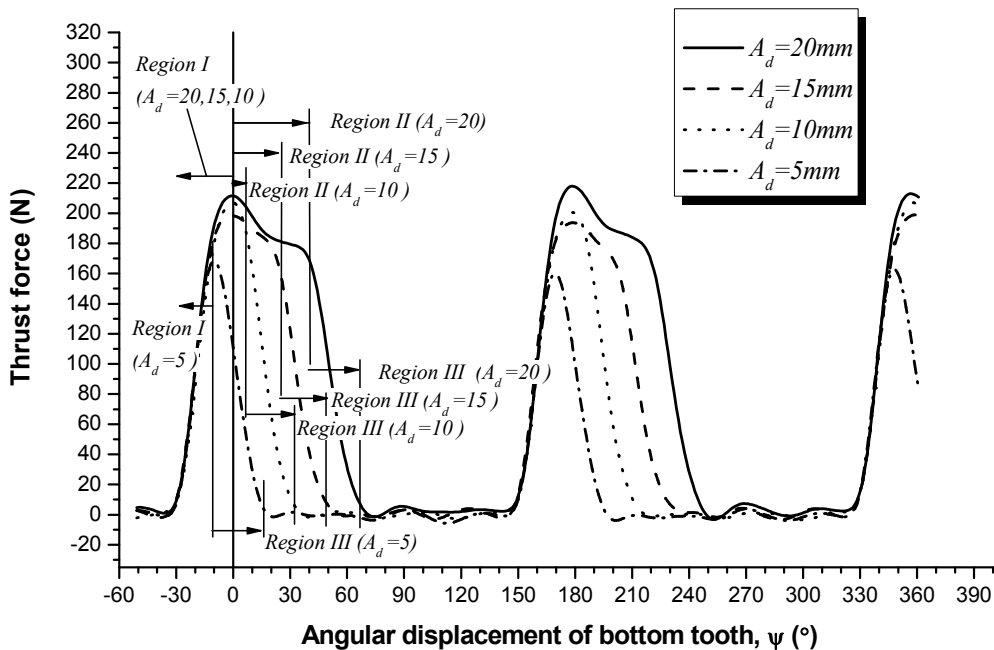


Fig. 8 Effect of axial depth of cut on thrust force

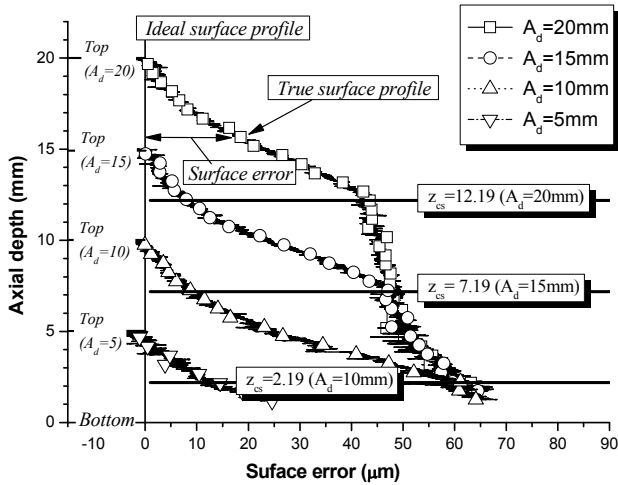


Fig. 9 Effect of axial depth of cut on straightness profile

있는 축 방향 가공면 형상을 축 방향 절삭깊이 차이에 해당하는 만큼 상하로 이동시키면, 모든 실험 결과는 한 가지 곡선 형태로 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서, 실험 오차를 감안할 때, 공작물 상단에서부터 아래로 동일한 축 방향 위치의 가공면 오차는 축 방향 절삭깊이의 영향을 크게 받지 않으며, 축 방향 절삭깊이를 제외한 모든 절삭 조건이 동일한 경우에는 항상 축 방향 위치에 해당하는 특정한 가공면 오차를 나타낼 것으로 예상된다. 또한, 가공면의 축 방향 형상은 서로 다른 기울기를 갖는 두 개의 직선이 교차하는 것으로 단순화 할 수 있으며, 이 때 두 직선의 교차점의 축 방향 위치는 z_{cs} 와 일치할 것으로 추정된다.

5. 결론

엔드밀링 공정은 절삭면적이 증가-일정-감소하는 주기적인 변화의 반복을 통하여 가공면 측벽 형상을 창성한다. 이 절삭면적의 변화는 배분력의 변화를 유발하여 공구 변형에 의한 가공면의 축 방향 진직도 특성에 영향을 미친다. 본 연구에서는 공구의 회전에 따른 공구와 공작물의 기하학적 관계를 규명하여 절삭면적을 모델링 하였다. 이 모델 및 실험을 통하여, 음의 배분력이 발생하지 않는 안정적인 절삭작업에서, 상향절삭은 절삭면적이 증가-일정 영역에서, 하향절삭은 일정-감소 영역에서 가공면이 창성되는 것을 확인하였다. 아울러, 영역의 변화에 따른 가공면 기울기 변화 발생 위치에 대한 해석적 추정의 타당성도 실험을 통하여 확인하였다. 이와 같은 엔드밀링 가공 측

벽의 진직도 특성은 형상창성기구에서 기인한 것이므로, 절삭 조건이나 공작기계-공구-공작물 시스템의 변화를 통하여 감소시킬 수 있으나, 반경 방향 및 축 방향 절삭깊이 값이 존재하는 한 항상 존재한다. 따라서, 엔드밀링 가공된 측벽의 축방향 진직도 오차의 완전한 제거는 불가능하다고 판단 된다.

후 기

2011 학년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Design Research*, Vol. 22, pp. 7~22.
- (2) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 104, pp. 272~278.
- (3) Kline, W. A. and DeVor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *Int. J. Mach. Tool Design Research*, Vol. 23, pp. 123~140.
- (4) Sutherland, J. W. and DeVor, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME J. of Eng. for Ind.*, Vol. 108, pp. 269~279.
- (5) Budak, E. and Altinras, Y., 1994, "Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy," *Int. J. Mach. Tool Manu.*, Vol. 34, pp. 907~918.
- (6) Elbestawi, M. A., Ismail, F., and Yuen, K. M., 1994, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," *Int. J. Mach. Tool Manu.*, Vol. 34, pp. 245~255.
- (7) Yang, M. Y. and Choi, J. G., 1997, "On-line Tool Deflection Compensation System for Precision End-milling," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 21, No. 2, pp. 189~198.
- (8) Lee, S. K. and Ko, S. L., 1999, "Analysis on the Precision Machining in End Milling Operation by Simulating Surface Generation," *J. of the KSPE*, Vol. 16, No. 4, pp. 229~236.
- (9) Ryu, S. H., Kim, M. T., Choi, D. K., and Chu, C. N., 1999, "Plane Surface Generation with a Flat End Mill," *J. of the KSPE*, Vol. 16, No. 2, pp. 234~243.
- (10) Ryu, S. H., Choi, D. K., and Chu, C. N., 2003, "Optimal Cutting Condition in Side Wall Milling Considering Form Accuracy," *J. of the KSPE*, Vol. 20, No. 10, pp. 31~40.

- (11) Ryu, S. H. and Chu, C. N., 2004, "Form Error Prediction in Side Wall Milling Considering Tool Deflection," *J. of the KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp. 43~51.
- (12) Song, T. S., Ko, T. J., Kim, H. S., and Lee, J. H., 2007, "Study on the Change of Cutting Force Direction in Endmilling," *J. of the KSPE*, Vol. 24, No. 10, pp. 37~45.
- (13) Kalpakjian, S. and Schmid, S. R., 2008, *Manufacturing Processes for Engineering Materials 5th ed.*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 429~430.