

공구날당 소재제거량이 각주형상 밀링가공물의 측방향 형상에 미치는 영향

김광희*

(논문접수일 2004. 8. 2, 심사완료일 2004. 8. 31.)

Effect of Material Removal per Tooth on the Axial Shape of Prismatically Milled Parts

Kwang Hee Kim*

Abstract

A study for investigating the effects of the cutting conditions (radial depth of cut, feed per tooth) and the number of tooth on the side wall of prismatically milled workpiece is described. This study is available not only for understanding the geometrical characteristics of the end milled side wall but also for finding the optimal cutting conditions. In this work, the side wall geometry was characterized by the straightness and the location of maximum peak point. Through this study, it was revealed that the geometrical characteristics of the end milled side wall are strongly related to the material removal per tooth and the number of tooth.

Key Words : End milling(엔드 밀링), Cutting conditions(가공조건), Straightness(진직도), Location of maximum peak point(최대극점 위치), Material removal per tooth(공구날당 소재제거량)

1. 서론

일반적으로 기계가공된 부품의 품질은 형상정밀도와 표면거칠기 등의 가공면 특성에 의하여 결정된다. 부품의 바닥면이나 측벽을 가공하는데 사용되는 대표적인 기계가공법인 평엔드밀가공의 경우, 생성된 가공면의 특성은 다듬질과 같은 마무리 사상작업과 밀접한 관계를 갖고 있다.

그러므로, 제품의 품질 및 생산성 향상과 관련하여, 절삭조건이 가공면의 특성과 형상 정밀도에 미치는 영향에 관

한 관심이 증가하고 있다. 이와 관련하여, Ryu⁽¹⁾는 측벽엔드밀 가공 시 반경방향 절삭깊이와 측방향 절삭깊이의 최적 절삭조건을 선정하는 연구에서 반경방향 절삭깊이가 가공면의 형상특성에 영향을 준다고 보고 하였다. Choi와 Yang⁽²⁾ 등은 절삭깊이에 따른 가공면의 가공오차에 대한 연구에서 공구의 절삭력이 나타내는 변화를 이용하여 절삭깊이를 추정하고 최대극점의 위치가 변하는 것에 대하여 논하였다. Budak^(3,4) 등은 측벽가공에서 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 변화에 따른 가공면의 형상오차 추정식

* 국민대학교 대학원 기계설계학과 (kkhkbs@hanmail.net)
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1

을 확립하고, 예측값과 실험값의 비교를 통하여 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 적절한 절삭조건 선정에 관하여 고찰하였다.

이미 발표된 연구 내용을 통하여, 엔드밀 가공 시 절삭조건이 가공면의 형상 정밀도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 각주 형상의 공작물의 가공면에 대한 연구는 바닥면과 측벽 가공으로 나누어 공구 이송방향의 형상 특성을 고찰한 것이 대부분이고 공구 축방향의 형상특성에 관한 연구는 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는, 각주 형상을 평엔드밀로 가공할 경우 작업자가 선정할 수 있는 절삭조건 중 절삭깊이, 이송 속도, 공구 날수 등의 공구날당 소재제거량과 관련이 있는 조건을 변수로 하여 실험을 수행하고, 이 실험 결과를 토대로 하여 가공면의 공구 축방향 형상특성에 대하여 알아보고자 한다.

2. 시편 및 실험장치

2.1 시편

본 연구에서는 기계부품으로 이용되는 기계 구조용 탄소강 SM45C를 시편 재료로 선정하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 시편은 밀링과 평면연삭기 작업을 통하여 각주형상으로 준비되었다. 아울러, 시편의 주요 치수 및 가공방향도 Fig. 1에서 보여 주고 있다.

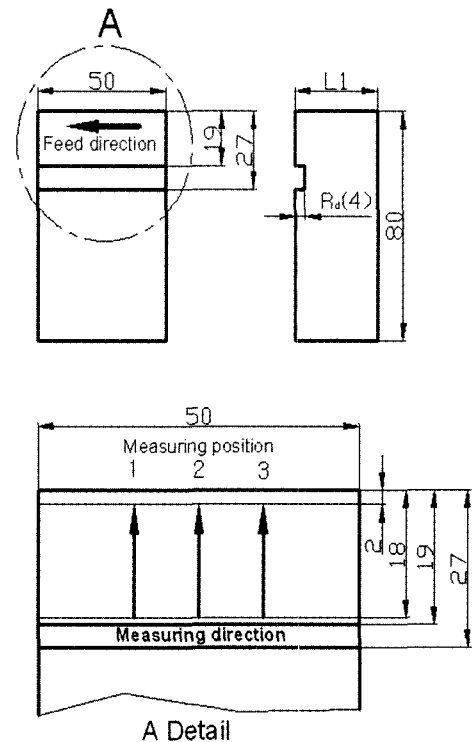
이 그림에서 L1은 시편 두께를 표시하고 있다. L1 치수는 실험 조건에 따라 반경방향 절삭깊이가 변화되는 것을 감안하여, 실험가공 후 시편의 두께를 30mm로 일정하게 유지할 수 있도록 설정하였다. 또한, 실험 중에 밀 날에 의한 바닥면 가공의 영향을 배제하고 측벽가공의 특성만을 고려하기 위하여, 실험가공 중 평 엔드밀 날의 끝부분이 위치하는 지점에 홈 가공을 실시하였다. 아울러, 실험 전 시편의 가공면 형상오차가 상대적으로 큰 경우에는 실험 후 가공면의 형상특성에 영향을 미치므로, 가공 전에 임의의 시편 9개를 추출하여 진직도 오차를 측정하였다. 측정 결과 진직도 값은 평균 0.36 μ m를 갖는 것이 확인되었으며, 이 값의 실험 결과와의 비교를 통하여 실험의 신뢰도를 간접적으로 확인할 수 있다.

2.2 가공 및 측정

본 연구에서 사용된 CNC밀링머신은 통일중공업에서 제작한 TMV-40M기종이다. Table 1은 CNC밀링머신의 주요 사양을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 절삭공구는 고온에

서 내산화성이 우수하고, 열확산률이 높아 내열 충격성이 양호한 티타늄 코팅(TiCN coating)-HSS 평 엔드밀(Flat End-Mill) 공구로서, 헬릭스 각은 30°이고 직경은 \varnothing 20mm인 것을 선정하였다. 실험 조건 중의 하나인 공구 날수는 각각 2, 3, 4 및 6날을 선택하였다. 공구의 마모가 가공면의 창성 과정에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 시편 가공 후에는 항상 공구현미경으로 공구의 마멸 상태를 확인하였다. 확인결과, 시편을 8개 가공한 후에는 공구의 마멸이 그 이전에 비하여 상대적으로 심해지는 것이 확인되었다. 그러므로 공구교환은 실험 가공 8회를 기준으로 하여 실시하였다.

측정기로는 Taylor Hobson사의 Talysurf Series 2를 사용하였으며, 가공된 시편의 형상정밀도는 진직도 값으로 분석하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 가공된 면의 상단과 하단에서 각각 2mm와 1mm를 제외하고 공구 축과 평행하게 아래쪽에서 위쪽으로 진직도를 측정하였다. 이 그림에 표시



	Dimension
L1(mm)	31.0, 31.5, 32.0

Fig. 1 Shape and dimension of specimen

Table 1 CNC milling machine specification

Table size(mm)		900×410
Traverse X, Y, Z axis(mm)		560×410×510
Spindle	speed(rpm)	40~4000
	taper	NT. 40
	motor power(kw)	AC 5.5
Feed rate(mm/min)		1~5000
CNC		Fanuc 0M

된 1, 2, 3은 측정위치를 보여주고 있으며, 가공면의 측방향 진직도는 세 위치에서 측정된 값의 평균값으로 나타낸다.

3. 실험

작업자가 가공 중에 조절할 수 있는 변수 및 공구의 선정에 따라 가공면의 품질 및 생산성이 영향을 받는다. 따라서 각주형상 밀링가공 시, 반경방향 절삭깊이(R_d)와 절삭속도, 이송속도(F), 공구의 날수(Z)의 변화가 공구측방향 형상정밀도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행한다. 실험의 보편성을 확보하기 위하여 절삭조건은 *Machining data handbook*⁽⁵⁾에 있는 값을 기준으로 하여 설정하였다.

실험을 위한 절삭 조건은 앞에서 언급한 절삭깊이, 이송속도, 절삭속도를 바탕으로 하여 계산되는 가공 변수인, 공구 날당 이송거리도 활용하고자 한다. 공구날당 이송거리(f_t)는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_t = \frac{F}{Z \times N} \quad (1)$$

위의 식에서 F , Z 및 N 은 각각 이송속도, 공구의 날 수 및 주축회전수를 의미한다.

3.1 실험 1

동일한 날의 수를 가진 공구의 경우에 날 당 이송거리를 증가시킬 때에 가공 효율은 높아지나 가공면의 형상 정밀도는 저하된다⁽¹⁾. 따라서 실험 1에서는 이 연구를 바탕으로 하여 공구날당 이송거리와 반경방향 절삭깊이의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이 실험에서 공구날당 이송거리와 주축회전수는 각각 0.05, 0.07, 0.09 mm/tooth과 398, 557, 716rpm으로 설정하였다. Table 2는 실험 1의 가공조건을 나타내고 있다.

Table 2 Experimental conditions(Experiment 1)

Radial depth of cut R_d (mm)	Feed pre tooth f_t (mm/tooth)	Spindle speed N (rpm)	Feed rate F (mm/min)	
1.0	0.05	398	40	
		557	56	
		716	72	
	1.5	0.07	398	56
			557	78
			716	100
2.0	0.09	398	72	
		557	100	
		716	129	

3.2 실험 2

작업자가 선정하는 조건 중 반경방향 절삭깊이와 이송속도, 절삭속도의 변화에 따라 공구가 회전을 하면서 각각의 날이 가공면에 형상오차를 나타낸다. 실험 2에서는 각주형상의 측벽을 가공 하였을 때에 생길 수 있는 여러 오차의 요인 중에서 공구 날수의 변화와 반경방향 절삭깊이의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이 실험에서 절삭속도, 측방향 절삭깊이 및 공구날당 이송거리는 각각 35m/min(주축회전수: 557rpm), 20mm, 0.07mm/tooth로 고정하였다. Table 3은 실험 2의 가공조건을 나타내고 있다.

4. 고 찰

실험 결과의 고찰을 위하여 편의상 공구날당 소재제거량(A)이라는 새로운 변수를 도입한다. 이 변수는 이송속도, 공구 날수 및 주축회전수에 의하여 식 (1)과 같이 정의된 공구 날당 이송거리와 반경방향 절삭깊이(R_d)를 이용하여 다음과 같이 식 (2)로 나타낼 수 있다.

Table 3 Experimental conditions(Experiment 2)

Number of tooth Z	Feed rate F (mm/min)	Radial depth of cut R_d (mm)
2	78	0.5
3	117	
4	156	0.75
6	234	1.0

$$A = R_d \times f_t \quad (2)$$

실험 결과는 형상오차와 직접적인 연관이 있는 진직도와 가공면의 형상 특성을 나타낼 수 있는 최대 극점의 위치로 표현한다. 본 연구에서 의미하는 진직도는 가공면상의 측정 구간 내에 있는 모든 점들이 기하학적으로 평행인 두 직선 사이에 존재한다고 가정할 때, 두 평행선 사이의 간격을 최소로 하는 값을 의미한다. 이 때, 진직도 값이 같을지라도 가공면의 형상은 다른 형태를 나타낼 수 있다. 따라서, 진직도 값만으로는 형상 특성을 명확히 나타내기에는 한계가 있으므로, 이러한 문제점을 보완하기 위하여 최대 극점의 위치를 측정하였다. Fig. 2는 최대 극점의 위치를 보여주고 있다. 이 최대 극점의 위치는 가공면의 상단에서부터 하단방향으로 측정하여 mm단위로 나타낸다. 일반적으로 최대 극점의 위치는 정밀한 조립 시에 발생할 수 있는 잼(Jam)현상 및 마무리 작업으로 쓰이는 사상 작업과 밀접한 관계를 갖는다.

4.1 고찰(실험 1)

실험 1에서는 반경방향 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 실험하였다. Fig. 3과 4는 반경방향 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 변화를 공구날당 소재제거량으로 환산한 값을 기준으로 하여 진직도 값과 최대극점의 위치를 각각 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 측정 결과를 직선 및 곡선 적합한 결과를 통하여, 공구날당 이송거리는 직선개형, 반경방향

절삭깊이는 곡선개형 특성을 나타냄을 알 수 있다. 직선개형은 공구날당 이송거리가 각각 0.05, 0.07, 0.09mm/tooth로 정해진 경우에 반경방향 절삭깊이가 1.0, 1.5, 2.0mm로 증가하면서 나타나는 개형이다. 직선개형의 기울기가 양(+)의 값으로 증가한다는 것은 반경방향 절삭깊이의 증가로 인하여 공구날당 소재제거량이 증가되면, 진직도 값이 증가하여 가공면의 형상오차를 증가시키는 현상이 발생하는 것을 의미한다. 곡선개형의 경우에는, 반경방향 절삭깊이가 일정할 때, 공구날당 이송거리가 증가하여 공구날당 소재제거량이 증가로 야기되는 진직도의 변화를 나타낸다. 이 곡선개형은 극소값을 갖는 것을 보여준다. 따라서 공구날당 이송거리 측면에서 볼 때, 형상오차를 최소화하는 값이 존재하는 것을 알 수 있다. 본 실험조건 중에서 공구날당 이송거리가 0.07 mm/tooth일 때로 진직도 값이 최소임을 나타내고 있다. 개형간의 특징을 고찰하면, 공구날당 이송거리가 0.07mm/tooth로 정해지고 반경방향 절삭깊이가 증가할 경우에 최적의 형상오차를 가지는 것을 알 수 있다. 아울러 공구날당 소재제거량의 변화가 커질수록 개형의 변화 폭도 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 공구날당 이송거리 및 반경방향 절삭깊이의 변화가 최대 극점 위치에 미치는 영향을 보여주고 있다. 실험 결과 측정된 위치를 직선으로 적합한 결과를 실선과 점선으로 나타내었다. 이 실선과 점선은 각각 공구날당 이송거리를 일정하게 유지하고 반경방향 절삭깊이를 변화시키는 경우와 반대로 반경방향 절삭깊이를 일정하게 유지하면서 공

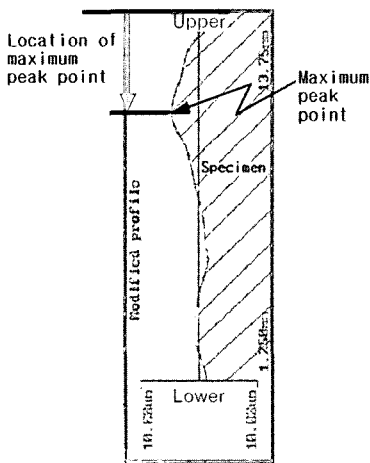


Fig. 2 Location of maximum peak point

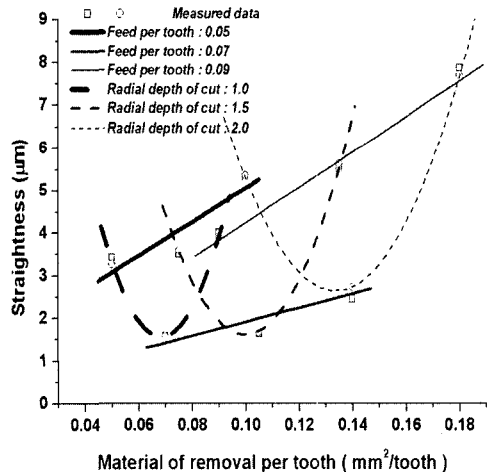


Fig. 3 Experimental result 1(Straightness)

구날당 이송거리를 변화시키는 경우를 나타낸다. 실선들은 모두 반경방향 절삭깊이가 증가하여 공구날당 소재제거량이 증가되면 최대 극점의 위치가 증가하는 것을 나타낸다. 이는 반경방향 절삭깊이의 변화가 상대적으로 미절삭이 발생하는 위치의 변화시키는 것을 의미하며, 가공면을 기준으로 하여 볼 때, 최대 극점의 위치가 가공면의 상단에서 하단으로 이동하는 것을 보여준다. 아울러, 점선들은 가로방향으로 분포하는 특징을 나타내는데, 이는 반경방향 절삭깊이가 일정한 경우에는 공구날당 이송거리가 증가하여 공구날당 소재제거량이 증가되어도 최대 극점의 위치에는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서, 가공면에서 최대 극점의 위치를 변화시키지 않고 생산성을 높이려면 반경방향 절삭깊이를 증가시키는 것 보다 공구날당 이송거리를 증가시켜서 가공하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 3과 4에서 나타내는 특징을 종합하여 볼 때, 반경방향 절삭깊이가 가공면의 형상에 가장 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 이미 발표된 연구 내용 중, 가공면의 형상오차와 형상특성을 도식화한 결과에서도 반경방향 절삭깊이의 증가가 최대극점의 위치를 증가시키는 것으로 알려져 있다^(6,7).

4.2 고찰(실험 2)

평엔드밀을 이용한 하향가공 시, 공구날수와 반경방향 절삭깊이의 변화가 가공면 형상에 미치는 영향을 고찰한다. Fig. 5는 공구날수가 변화될 때, 공구날당 소재제거량에 대한 진직도 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 볼

수 있듯이, 날수가 많은 공구를 사용하여 가공하면 진직도 측면에서 유리할 뿐만 아니라, 공구날당 소재제거량 증가 시 선형적으로 증가되는 진직도의 기울기 측면에서도 상대적으로 유리한 것을 확인할 수 있다.

이 그래프는 공구날당 이송거리를 0.07mm/tooth로 고정시킨 후 반경방향 절삭깊이를 0.5, 0.75, 1.0mm로 증가시킬 때, 이에 대응하여 변하는 공구날당 소재제거량을 기준으로 하여 나타낸 것이다. 그래프의 기울기가 양(+)의 값을 갖는다는 것은 반경방향 절삭깊이의 증가로 공구날당 소재제거량이 증가되면서 진직도 값이 증가하는 것을 의미한다. 아울러, 공구날수가 증가하면 가공면의 진직도가 향상되는 경향을 보일 뿐만 아니라, 공구날당 소재제거량이 증가할 때, 진직도가 나빠지는 경향이 상대적으로 공구날수가 많은 경우에 덜한 것을 보여준다. 이는 공구날수가 가공면의 형상오차와 밀접한 관련이 있음을 의미하며, 공구날당 이송거리가 일정한 경우에 날의 개수가 많을수록 한 날에 의하여 제거되는 칩의 두께가 감소되어 진직도가 우수한 가공면을 얻을 수 있는 것으로 추정된다. 따라서 형상정밀도 측면에서 볼 때, 공구날수가 많은 것을 선택하는 것이 유리하고 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 5에서와 마찬가지로 공구날당 소재제거량이 변화될 때, 공구날수가 가공면의 최대극점 위치에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다.

이 그림에서 볼 수 있듯이, 최대극점 위치는 공구날수와 상관없이 공구날당 소재제거량 증가에 따라 증가하는 것을 나타낸다. 그러나, 공구날당 소재제거량이 증가에 따른 최대극점의 위치 변화량은 공구날수가 많을수록 커져서, 공구

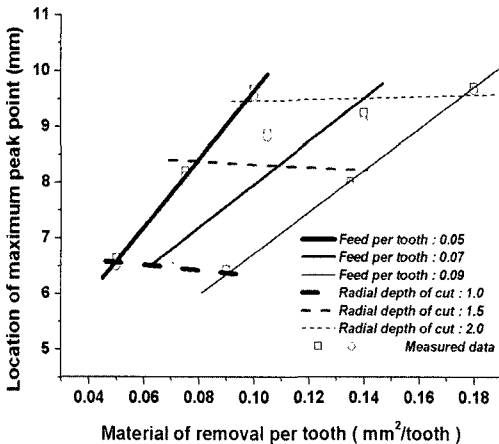


Fig. 4 Experimental result 1
(Location of maximum peak point)

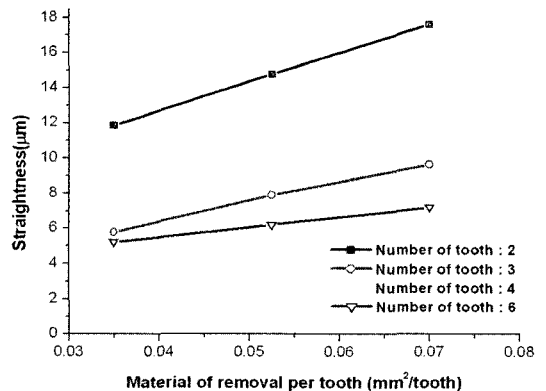


Fig. 5 Experimental result 2 (Straightness)

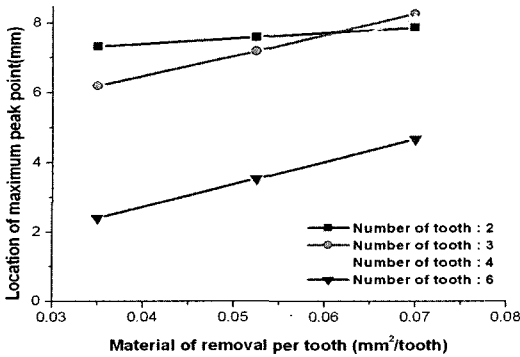


Fig. 6 Experimental results (Maximum peak point)

날당 소재제거량이 작은 경우에는 공구날수에 다른 최대극점 위치의 편차가 크지만 상대적으로 공구날당 소재제거량이 커지면 공구날수가 최대극점 위치의 편차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 한 예로, 공구날당 소재제거량 $0.035\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 2날공구와 6날공구를 각각 사용한 경우를 비교해 보면, 최대극점 위치의 차이는 5mm로 공구날수가 증가할수록 최대극점의 위치는 상단에 가깝게 위치하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 공구날당 소재제거량이 $0.07\text{mm}^2/\text{tooth}$ 로 증가된 경우의 최대극점 위치 차이는 3.5mm로 감소한다. 이러한 현상은 공구날수가 3, 4인 경우에 더욱 명확하게 나타나는데, 그래프에서 볼 수 있듯이 2날공구로 가공하였을 때와 비교하여 보면, 공구날당 소재제거량이 증가되면 사용된 공구의 날수에 따라 최대극점의 위치가 역전되는 것을 볼 수 있다. 고찰 결과 작업자가 가공조건을 선정할 때에 공구날당 소재제거량이 증가하여도 공구날수의 변화에 따른 최대극점의 위치를 예측할 수 있다. 따라서 마무리 사상작업 등의 생산성에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 평 엔드밀을 이용하여 각주형상을 밀링가공 시 가공조건(반경방향 절삭깊이, 날당 이송거리, 공구날수)의 변화가 가공면의 축방향 형상특성에 미치는 영향에 대하여 실험하였으며, 실험 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 반경방향 절삭깊이는 가공면의 형상특성에 가장 큰 영

향을 미친다.

- (2) 가공 면에서 최대 극점의 위치를 변화시키지 않고 생산성을 높이려면 반경방향 절삭깊이를 증가시키는 것보다 공구날당 이송거리를 증가시키는 것이 더욱 효과적이다.
- (3) 공구날 수 증가는 진직도 값을 감소시키므로 형상 정밀도 측면에서 볼 때 공구날수가 많은 것을 선택하는 것이 유리하다.

참고 문헌

- (1) 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. 31~39.
- (2) Choi, J. G., and Yang, M. Y., 1998, "In-Process Prediction of the Surface Error Using an Identification of Cutting Depths in End Milling Operation by Simulating Surface," *J. of the KSPE*, Vol. 15, No. 2, pp. 114~123.
- (3) Budak, E., and Altintas, Y., 1994, "Peripheral Milling Conditions for Improved Dimensional Accuracy," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 7, pp. 907~918.
- (4) Budak, E., and Altintas, Y., 1995, "Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 35, pp. 459~476.
- (5) *Machining Data Handbook*, 3rd edition, 1980, Section 2- I, 2-II, pp. 131.
- (6) Ko, S. L., Lee, S. K., and Bae, S. M., 2001, "Study on the Design of End Mill Geometry," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 8, pp. 24~31.
- (7) Kline, W. A., Devor, R. E., and Shareef, I. A., 1982, "The prediction of surface accuracy in end milling," *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 104, pp. 272~278.