

공구날당 소재제거량이 원통형 밀링가공물의 원주형상에 미치는 영향

김광희*

(논문접수일 2004. 8. 2, 심사완료일 2004. 8. 31)

Effect of Material Removal per Tooth on the Circumferential Shape of Cylindrically Milled Parts

Kwang Hee Kim*

Abstract

A study for investigating the effects of the cutting conditions(feed rate, radial depth of cut, cutting speed) and the tool diameter on the circumferential geometry of the cylindrically end-milled workpiece is described. In this work, the circumferential geometry is characterized by the roundness error. Experimental results show that the circumferential geometry is directly affected by the material removal per tooth, which is defined as a function of the cutting speed, the feed rate and the radial depth of cut. And, the radial depth of cut is revealed to be the most critical condition among them. It is also found that the roundness error decreases when the tool diameter is larger under the same cutting conditions.

Key Words : End milling(엔드 밀링), Cutting condition(가공조건), Roundness error(진원도오차), Material removal per tooth(공구날당 소재제거량), Radial depth of cut(반경방향 절삭깊이), Tool diameter(공구경)

1. 서론

고품질 제품의 요구에 따라 가공면의 창성기구와 형상 정밀도에 대한 관심이 커지고 있다. 따라서 절삭 시에 가공정도, 다듬질 면의 거칠기 및 형상특성에 대한 고려가 요청된다. 예를 들어, 금형의 코어 부는 CNC밀링 작업 시에 생성된 제품의 면으로 제품의 정밀도나 형상특성은 조립성과

밀접한 연관을 갖게 된다. 이러한 이유로 엔드밀 공구와 절삭조건이 가공면에 나타내는 형상특성이 주요 관심의 대상이 되고 있는 추세이다.

이와 관련하여, Budak^(1,2)은 측벽가공에서 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 변화에 따라 가공면의 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 적절한 절삭조건 선정에 관하여 고찰하였으며, Ryu⁽³⁾는 공구변형을 이용한 가공면의 형상오차

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

예측 방법으로 시뮬레이션을 통하여 최적화된 가공조건을 찾는데 유용하게 이용될 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 Ko⁽⁴⁾ 등은 공구 경사각, 여유각, 날부길이 및 헬릭스각 등이 절삭에 미치는 영향에 대하여 분석하였으며, 절삭속도의 증가는 절삭력의 방향에 영향을 미치므로 표면조도나 가공정밀도를 개선시키는 효과가 있음을 밝혔다. Tlustý⁽⁵⁾는 공구와 공작물의 상대운동 방향과 가공경로에 따른 축 방향 절삭 깊이를 변화시킴으로써 공구에 발생하는 진동을 줄이고 평면가공에서의 정밀도를 향상시킬 수 있다고 기술하였다. 그러나, 평 엔드밀로 하향가공에 의한 원통형상의 측벽가공 시 가공경로가 형상정밀도에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 분석한⁽⁶⁾ 내용을 제외하면, 대부분의 기 발표된 연구 결과는 가공면의 형상정밀도에 관한 특성을 각주형상의 공작물에 대하여 평면가공과 측벽가공으로 나누어 고찰하는 것이 주를 이루고 있으며, 원통형상의 가공면에 대한 형상 정밀도 특성에 관한 연구는 다소 미흡한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 원통형상을 가공할 경우에 작업자가 선정할 수 있는 가공조건의 변화가 가공면의 형상특성에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 실험에서 고려한 가공조건의 요소는 공구경의 크기와 절삭깊이, 공구날당 이송거리 및 절삭속도의 변화이다. 이 가공조건이 가공면에 미치는 영향에 관하여 실험을 수행하고, 이를 분석하여 가공면의 형상 특성을 최적화하는 방안에 대하여 알아보고자 한다.

2. 시편 및 실험장치

2.1 시편 및 절삭공구

본 실험에서 사용된 시편은 기계구조용 탄소강 SM45C로 직경이 $\varnothing 68\text{mm}$ 인 환봉을 CNC 선반작업과 밀링작업을 통하여 준비하였다. 완성한 시편의 형상 및 치수를 Fig. 1에서 나타내었다. 원통형상은 실험을 하기 위한 가공면으로서 치수오차 범위는 $\pm 0.005\text{mm}$ 이내가 되도록 하였으며, 시편의 중간부분은 바이스에 의한 고정부분으로서 $\pm 0.005\text{mm}$ 이내의 치수 오차를 가지고 있다.

실험에 사용된 절삭공구는 고온에서 내산화성이 우수하고 내열 충격성이 양호한 티타늄 코팅(TiCN coating)-HSS 표준 2날 엔드밀이며, 공구는 직경이 각각 $\varnothing 16\text{mm}$, $\varnothing 20\text{mm}$, $\varnothing 25\text{mm}$ 이며 헬릭스각이 30° 인 것을 선정하였다. 아울러 공구 마멸이 가공면의 창성 과정에 미치는 영향을 최소화하기 위하여, 매 시편 가공 후에 공구현미경으로 공구의 마멸을 관찰하였다. 관찰 결과, 시편을 5개 가공한 후

에는 공구의 마멸이 그 이전에 비하여 상대적으로 심해지는 것이 확인되었다. 그러므로 공구 교환은 실험 가공 5회를 기준으로 하여 실시하였다.

2.2 실험장치 및 측정

본 실험에 사용된 공작기계는 통일중공업에서 제작한 수직형 CNC 밀링머신 TMV-40M 기종이며, Table 1은 CNC 밀링머신의 주요사양을 나타내고 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 시편의 상단을 기준으로 하여 축방향으로 20mm를 가공하였으며, 가공면의 상하 양단에서 각각 3mm씩을 제외하고 위에서 아랫방향으로 1mm 간격으로 총 15단에 대하여 원주 방향 형상정밀도를 측정하였다. 가공된 시편의 형상정밀도는 진원도 값으로 분석하였다. 측정기로 Taylor Hobson사의 Talyrond 252를 사용하였다.

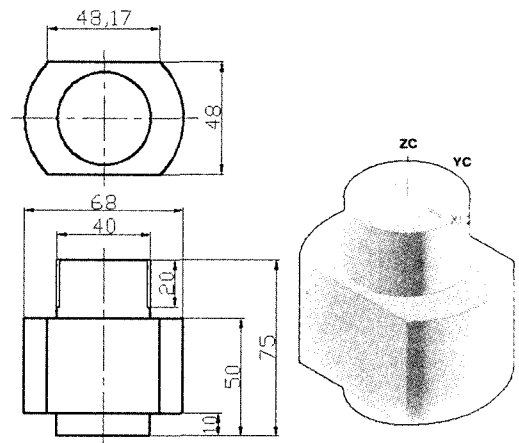


Fig. 1 Shape and dimension of workpiece

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

3. 실험방법

원통형상 밀링가공 시, 반경방향 절삭깊이, 이송속도, 절삭속도 및 공구경의 변화가 원주 방향 형상정밀도에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 실험의 보편성을 확보하기 위하여 절삭 조건은 *Machining data handbook*⁽⁷⁾에 있는 값을 기준으로 하여 설정하였다.

실험을 위한 절삭 조건은 앞에서 언급한 절삭깊이, 이송속도, 절삭속도를 바탕으로 하여 계산되는 가공 변수인, 공구날당 이송거리도 활용하고자 한다. 공구날당 이송거리(f_t)는 다음과 같은 식 (1)으로 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 절삭깊이와 이송거리(실험 1)

실험 1에서는 반경방향 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 분석하고자 한다. Table 2는 본 실험의 가공조건을 나타낸다.

이 실험에서 공구경과 주축 회전수는 각각 $\varnothing 20\text{mm}$, 477 rpm으로 고정하였으며, 공구날당 이송거리의 변화에 따른 이송속도를 구하였다. 가공조건으로 반경방향 절삭깊이는 2가지(0.5mm, 1.0mm), 공구날당 이송거리는 3가지(0,07mm/min, 0,08mm/min, 0,09mm/min)로 설정하였다.

3.2 절삭깊이와 절삭속도(실험 2)

실험 2에서는 반경방향 절삭깊이 및 절삭속도의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향에 대하여 실험하고자 한다. Table 3은 본 실험의 가공조건을 나타낸 것이다. 이 표에 나타난 공구날당 이송거리는 앞에 있는 식 (1)을 이용하여 계산된 결과이다.

Table 2 Experimental conditions(Experiment 1)

Radial depth of cut $R_d(\text{mm})$	Spindle speed $N(\text{rpm})$	Feed per tooth $f_t(\text{mm}/\text{min})$	Feed rate $F(\text{mm}/\text{min})$
0.5	477	0.07	67
1.0		0.08	76
		0.09	86

3.3 공구경과 이송거리(실험 3)

실험 3에서는 공구경의 변화에 따른 주축의 회전수 변화 및 공구날당 이송거리 값이 가공면의 형상에 미치는 영향을 조사하였다. 이 실험에 있어서 반경방향 절삭깊이 값은 1.0 mm로 고정하였으며, Table 4는 이 실험 조건을 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

엔드밀을 이용하여 원통형상의 측벽을 하향 가공할 때, 작업자가 선정할 수 있는 가공조건들이 가공면의 원주 방향 형상에 미치는 영향을 실험을 통하여 확인하였다. 실험 결과의 고찰을 위하여 편의상 공구날당 소재제거량(A)이라는 새로운 변수를 도입하였다. 이 변수는 이송속도, 공구날수 및 주축회전수에 의하여 식 (2)와 같이 정의된 공구날당 이송거리와 반경방향 절삭깊이를 이용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

위의 식에서 R_d 는 반경방향 절삭깊이를 의미한다. 아울러, 측정된 진원도 값들은 곡선적합 되었으며 이 곡

Table 3 Experimental conditions(Experiment 2)

Radial depth of cut $R_d(\text{mm})$	Feed rate $F(\text{mm}/\text{min})$	Feed per tooth $f_t(\text{mm}/\text{min})$	Spindle speed $N(\text{rpm})$
0.5	70	0.12	291
		0.14	250
		0.16	218
1.0	70	0.06	583
		0.07	500
		0.08	437
1.5	70	0.04	875
		0.047	745
		0.053	660

Table 4 Experimental conditions(Experiment 3)

Tool diameter $D(\text{mm})$	Feed rate $F(\text{mm}/\text{min})$	Feed per tooth $f_t(\text{mm}/\text{min})$	Spindle speed $N(\text{rpm})$
25	70	0.06	583
20		0.07	500
16		0.08	437

선을 이용하여 전반적인 영향 및 추세를 알아보려고 한다.

4.1 절삭깊이와 이송거리의 고찰(실험 1)

반경방향 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 고찰한다. Fig. 2는 반경방향 절삭깊이가 변화될 때, 공구날당 소재제거량에 대한 진원도 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 공구날당 소재제거량이 $0.035\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 진원도 값은 대략 $19\mu\text{m}$ 이고, $0.045\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서는 $16\mu\text{m}$ 정도이며 공구날당 소재제거량이 증가할수록 진원도 값은 좋아지고 있다. 반경방향 절삭깊이가 0.5mm 에서는 공구날당 소재제거량이 증가하여도 진원도 값은 차이가 작게 나타남을 확인할 수 있었으며, 진원도 값이 포물선 형태로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한 반경방향 절삭깊이가 1.0mm 에서는 공구날당 소재제거량이 $0.07\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 진원도 값이 대략 $34\mu\text{m}$ 이고, $0.09\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서는 $39\mu\text{m}$ 이다. 공구날당 소재제거량이 증가하면 진원도 값도 증가함을 알 수 있다. 공구날당 소재제거량 $0.035\text{mm}^2/\text{tooth}$ 와 $0.09\text{mm}^2/\text{tooth}$ 를 비교해 보면 진원도 값은 대략 $20\mu\text{m}$ 차이 값을 볼 수 있으며, 진원도 값이 포물선 방향으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 원통형상 밀링가공물의 원주형상을 각 가공조건에 따라 생성되는 가공면의 형상 특성을 진원도 값으로 고찰 해 볼 때, 반경방향 절삭깊이와 공구날당 이송거리의 선정은 가공면의 진원도 값을 증가시키거나 감소시킬 수 있다. 따라서, 반경방향 절삭깊이가 증가하면 진원도 값이 나빠지는 것을 확인하였으며 이는 반경방향 절삭깊이가 작으면 이송속도는 진원도 값의 변화에 영향을 미치지 않으나 반경방향 절삭깊이가 크면 이송속도의 증가에 따라 진원도 값이 급격히 증가하므로 이송속도는 절삭깊이를 고려하여 결정하여야 한다.

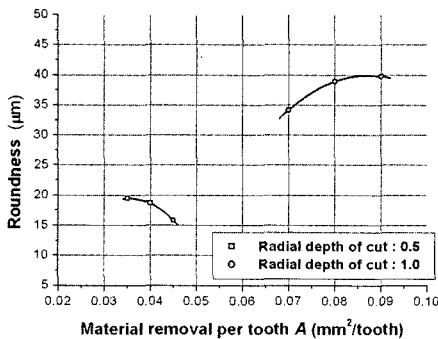


Fig. 2 Experimental results(Experiment 1)

4.2 절삭깊이와 절삭속도의 고찰(실험 2)

반경방향 절삭깊이와 절삭속도의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 고찰한다. Fig. 3은 각각의 반경방향 절삭깊이 변화에 대하여 절삭속도 변화에 의한 공구날당 소재제거량의 변화가 진원도 값에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 공구날당 소재제거량이 커질수록 진원도 값이 포물선 형태로 증가되고 있음을 확인할 수 있다. 공구날당 소재제거량이 $0.07\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서는 진원도 값이 대략 $22.5\mu\text{m}$ 에서 $37\mu\text{m}$ 정도로 반경방향 절삭깊이가 증가 할수록 진원도 값은 나빠지는 경향을 보이고 있다. 그 예로 반경방향 절삭깊이가 0.5mm 와 1.5mm 의 경우 공구날당 소재제거량 $0.06\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 $0.08\text{mm}^2/\text{tooth}$ 까지 진원도의 차이는 각각 $14\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ 정도로 $1\mu\text{m}$ 오차를 나타내고 있으며 이러한 오차는 매우 작은 값으로 공구날당 소재제거량이 증가하여도 진원도 값은 차이가 없음을 확인할 수 있다.

또한 공구날당 소재제거량 $0.08\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 볼 수 있듯이 반경방향 절삭깊이가 0.5mm 와 1.0mm 의 간격차가 큰 반면 1.0mm 와 1.5mm 의 간격이 좁아지고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 절삭량이 크면 공작물과 공구 사이에 절삭저항이 커지고 진동이 발생하여 공구의 이상적인 원호이송을 방해하므로 진원도가 나빠지는 것으로 보인다⁽⁸⁾. 가공면에 생성되는 형상특성은 절삭속도와 공구날당 이송거리가 증가하면서 나타나는 영향보다 반경방향 절삭깊이가 증가할 경우에 나타나는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 그래프에서 알 수 있듯이 진원도 값의 간격이 점차 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있다. 따라서 가공조건을 기준으로 설명하면 반경방향 절삭깊이와 공구날당 소재제거량의 증가를 의미하고 진원도 값의 변화가 적은

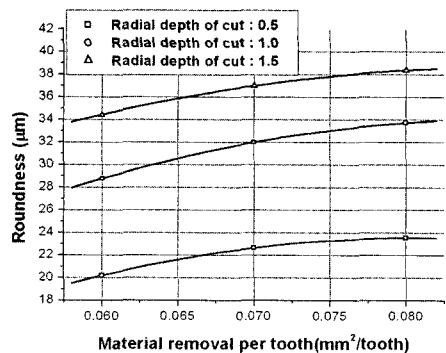


Fig. 3 Experimental results(Experiment 2)

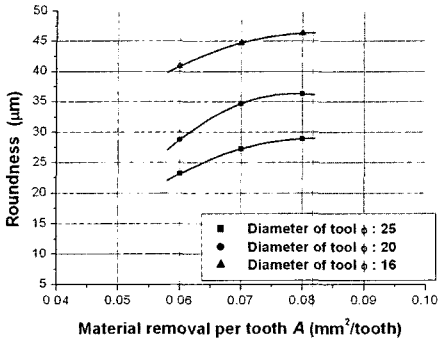


Fig. 4 Experimental results(Experiment 3)

절삭속도와 공구 날 당 이송거리로 적절한 선정으로 가공면의 형상특성을 향상 시킬 수 있는 방안이라 할 수 있다.

4.3 공구경과 이송거리의 고찰(실험 3)

공구경과 공구날당 이송거리의 변화가 가공면의 형상에 미치는 영향을 고찰한다. Fig. 4는 공구경이 변화될 때, 공구날당 소재제거량에 대한 진원도 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 공구날당 소재제거량이 $0.06\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 공구경과 진원도 값을 확인해 보면 공구경 25mm는 진원도 값이 $24\mu\text{m}$ 이며, 공구경 20mm는 $28\mu\text{m}$ 이다. 공구경 16mm에서는 $41\mu\text{m}$ 값을 나타내고 있다. 즉, 공구날당 소재제거량이 $0.06\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서는 진원도 값이 대략 $24\mu\text{m}$ 에서 $41\mu\text{m}$ 정도로 공구경이 감소할수록 진원도 값이 나빠지는 경향을 보이고 있다. 예를 들면 공구경 25mm와 16mm의 경우 공구날당 소재제거량 $0.06\text{mm}^2/\text{tooth}$ 와 $0.08\text{mm}^2/\text{tooth}$ 에서 진원도의 차이는 공구경 25mm와 16mm는 각각 $6\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ 로 공구날당 소재제거량이 증가하더라도 진원도 값은 차이가 없음을 확인할 수 있다. 또한 공구경 25mm와 20mm의 진원도 값 차이는 적은 반면 공구경 25mm와 16mm의 차이는 큰 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 공구날당 이송거리의 증가로 나타나는 영향보다 공구경의 증가가 영향이 더 큰 것을 의미한다. 본 실험에서 작업자가 가공조건을 선정할 때 공구날당 소재제거량이 증가하여도 공구경의 변화에 따른 진원도 값을 예측할 수도 있으며 가공면의 형상에 나타나는 형상 특성을 향상 시킬 수도 있다.

5. 결론

원통형상을 밀링가공 시 가공조건 변화가 가공면의 원주방향 형상특성에 미치는 영향에 대한 실험을 수행한 결과

도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 반경방향 절삭깊이가 증가되면 공구날당 소재제거량의 증가에 따라 진원도 값이 급격히 증가하므로 형상 정밀도를 악화시킨다.
- (2) 동일한 이송속도에서는 공구경 증가에 따라 진원도 값이 감소하므로, 형상정밀도 측면에서 볼 때 공구경이 큰 것을 선택하는 것이 유리하다.
- (3) 가공면의 형상특성에 대하여 공구날당 이송거리와 절삭속도는 반경방향 절삭깊이 및 공구경보다 상대적으로 적게 영향을 미친다.

참고 문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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. 24~30.
- (5) Tlustý, J., Smith, S., and Zamudia, C., 1990, "New NC routines for quality in milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 39/1, pp. 517~521.
- (6) Kim, K., 2003, "Effect of Tool Approaching Path on the Shape of Cylindrically Milled Parts," *J. of the KSMTE*, Vol. 12, No. 3, pp. 45~51.
- (7) *Machining Data Handbook*, 3rd edition, 1980, Section 2- I, 2- II, pp. 131.
- (8) Yoon, J. H., Cheong, M. S., and Lee, H. C., 2003, "A Study on Transition of Dimension Error and Surface Precision in High Speed Machining of Al-alloy," *J. of the KSMTE*, Vol. 9, No. 3, pp. 96~102.