

# 엔드밀에 의한 원통 가공시 절삭조건에 따른 진원도의 실험적 연구

김성철\*, 박희건\*, 이응석\*

An experimental study on the roundness effect for the cutting conditions in a cylinder cutting by end mill

Sung-Chung Kim\*, Hee-Gyun Park\* and Eung-Suk Lee\*

## Abstract

In this study the effect of roundness error with respect to the cutting conditions using the external cylindrical work piece by end mill cutting in a machining center was studied. The end mill used in this study is HSS coated with Ti-N which is of  $\phi 12-4$  flutes. The material of workpiece is SM20C and cutting oil is used as a cooling fluid. The cutting experiments were carried out for the several cutting conditions (depth of cut, height of end mill, feed rate, revolution per minute and cutting direction) and their roundness effects were compared using the least squares circle measuring method. The experimental results are summarized as follows; 1) The cutting depth is dominant for the roundness of a cylindrical work piece and the cutting speed must be determined precisely when the cutting depth is large, 2) When the cutting direction in circular manufacturing is the same with the spindle rotation, i.e., up-cutting condition, the surface roundness is also improved.

KeyWords : Roundness(진원도), Machining center(머시닝센터), External cylindrical cutting(원통가공), Least squares circle(최소자승원), End mill(엔드밀 가공), Up-cutting(상향절삭)

## 1. 서론

최근의 기계공업 분야는 고부가가치 제품 생산의 필요성으로 정밀가공을 위한 수치제어 공작기계의 사용은 필수적인 요소가 되었고 이러한 결과로 CNC 선반과 더불어 머시닝 센터의 수요가 급증하게 되었다. 인류가 사용하는 많은 기계류와 공구들은 작업과정에 있어서 회전운동이 주가 되며 대부분 원형부품으로 구성되었다고 볼 수 있고 이러한 원형부품의 형상이 진원도로부터 벗어났을 경우 원형부분에 마찰이 발생하게 되어 동력의 손실은 물론

마모에 의한 기계의 수명감소, 회전 및 상하이동의 부정확 등 여러 가지 문제가 발생된다. 일반적으로 원통형상의 정밀가공은 선삭, 원통연삭, 보링 등의 가공법을 주로 사용해 왔으나, 최근에는 머시닝 센터를 사용한 엔드밀 작업으로도 원통형상의 부품을 쉽게 가공할 수 있으며 가공품의 표면 거칠기, 진원도, 원통도 등은 형상 정밀도를 높이기 위한 주요한 인자로 사용되고 있다. 따라서 엔드밀 작업시 절삭조건에 따른 진원도의 변화를 비교 분석하여 최적의 절삭조건을 찾는 것은 매우 유용한 작업이 된다. 진원도는 원통형상 가공물의 표면을 2차원적으로 규정하는 형상공차이며 원형부분이 기하학적 원으로부터 벗어남의 정도를 말하며 측정방법은 다음절에서 기술한다. 원통가공물에서

\* 충북대학교 기계공학부

진원도의 불량 원인으로는 구성인선(built-up edge)의 생성 및 탈락, 공구의 강도 및 경도, 가공물의 재질, 공구의 마모, 절삭유유 유무, 기계의 정밀도, 기계의 강성, 진동 또는 채터(chatter)등의 요인을 들 수 있다.<sup>1,2,3)</sup>

본 실험적 연구에서는 엔드밀에 의한 머시닝센터에서 금속재료의 원통 가공시, 절삭깊이, 공구의 절삭높이, 회전수, 이송속도 등의 절삭조건과 시계방향 및 반시계방향의 절삭 후, 가공물의 진원도 측정에 의한 데이터를 비교 분석하여 높은 정밀도를 얻기 위한 최적의 절삭조건을 정리하여 산업현장에서의 유사한 작업시 효과적으로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 진원도의 측정 및 표시

진원도는 나라별로 표시하는 방법이 조금씩 다르나 크게 직경법, 3점법, 반경법으로 구분할 수 있다.<sup>3,4,5)</sup> 직경법은 원형부품의 한 단면에서 그 직경을 여러 방향으로 측정하여 최대치와 최소치의 차로써 진원도를 정의하는 방법이며 가공라인에서 가장 널리 사용되고 있는 방법으로 원형부분의 직경을 마이크로미터로 측정할 때 임의의 직각인 두 방향에서 측정한다. 그러나 실제로는 여러 방향에서 직경을 측정하여 그 차로 표시한다. 구멍이 있는 부품의 경우 실린더 게이지나 링 게이지 콤퍼레이터 등으로 내경을 측정하여 최대치와 최소치의 차를 구한다. 3점법은 원형부분을 2점에서 지지하고 그 두점의 수직2등분선상에 측정 기기를 위치시킨 후 피측정물을 360° 회전시켜 지침의 최대 이동거리로 진원도를 정의한 것으로 3점법에 의한 진원도 측정은 등경의 원일 경우 진원도 판단이 가능하나 3점을 이루는 스냅 각도와 요철의 개수에 따라 측정값이 달라지므로 가장 이상적인 상태로 측정하여야 한다. 반경법은 측정물을 센터에 지지하고 피측정물을 360° 회전시켰을 때 측정기기 지침의 최대치와 최소치의 차로써 진원도를 표시한다. 반경법의 경우에는 중심의 위치에 따라 진원도값의 차이가 생긴다. 그러므로 측정된 형상의 중심을 결정하는 조건이 필요하고 그 중심을 판정하는 방법을 별도로 규정하여야 한다.<sup>4,6,7)</sup> 측정치로부터 평균원 및 중심을 구하는 방법은 최소자승원법(least squares circle, LSC), 최소영역원법, 최소외접원법, 최대내접원법 등으로부터 구한다. 이들 방법 들은 측정 데이터로부터 모두 정확한 해를 구하기 위하여 대부분 수치해석적인 방법을 사용하고 각각의 정의에 부합되는 컴퓨터 알고리즘이 마련되어야 한다. 여기서는 본 연구에 사용된 최소자승원에 대해서만 간단히 기술한다.

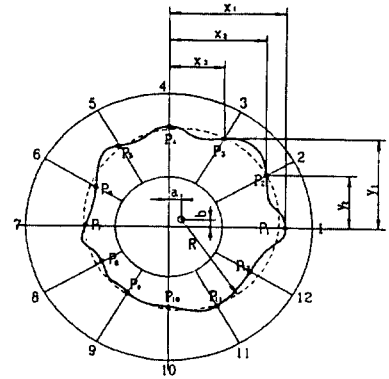


Fig.1 Least squares circle fitting.

Fig.1과 같이 측정데이터로부터 가중심(假中心)을 지나는 직각좌표를 설정하고, m등분한 반지름선이 측정데이터를 자르는 점의 가로 좌표를 x, 세로 좌표를 y로 하면,  $a=2\sum x/m$ ,  $b=2\sum y/m$ 을 가로 좌표·세로 좌표로 하는 점이 최소 자승 중심이다. 이 점을 중심으로 한 측정데이터까지의 반지름을 r로 할 때 최소자승원의 반지름은  $R=\sum r/m$ 으로 주어진다. 이 최소자승원으로부터 측정데이터 편차의 최대간격이 진원도이다. 이방법은 그래프에서도 수동으로 응용할 수도 있으나, 최근에는 자동 측정기를 사용하여 최소자승원을 구하여 진원도 오차를 계산할 수 있다. 계산식으로 표시할때의 정밀도는 m의 값, 즉 측정 데이터의 갯수에 의존한다.

## 3. 원통 가공 실험

### 3.1 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용한 시험편의 재료는 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 기계구조용 탄소강인 SM20C를 선택하였으며 머시닝 센터에서 원통 가공을 쉽게 하기 위해 CNC 선반으로 황·정삭 가공을 하여 원기둥 형상으로 시험편을 제작하였다. 실험에 사용한 공작기계는 정밀도와 강성이 높으며 가공 조건을 다양하게 변화시키며 작업할 수 있는 수직형 머시닝 센터를 사용하였다(Table 1). 실험조건을 선정하기 위한 예비 실험은 절삭조건을 변경하면서 8회에 걸쳐 실시하여 기계에 무리한 진동이 발생하지 않고 원활하게 작업할 수 있는

절삭조건으로 절삭깊이( $T_1=0.1, T_2=0.3, T_3=0.5, T_4=0.7$  mm), 엔드밀의 높이( $H_1=10, H_2=15, H_3=20$  mm), 회전수( $N_1=800, N_2=1000$  rpm) 이송속도( $F_1=80, F_2=100, F_3=120$  mm/min) 등을 선정하였다. 선정된 조건들에 따라 엔드밀을 사용하여 시계방향 및 반시계방향 절삭에 따른 프로그램을 작성하여 절삭 가공하였다. 시험편은 사용기계의 강성 및 공구의 재질 등을 고려하고 작업하기 편리한 크기와 모양으로 CNC 선반을 사용하여 원기둥 형태로 가공하였으며 그 형상과 치수는 Fig.2와 같다. 본 실험에 사용한 절삭공구는 고온에서 내산화성이 우수하고 열확산율이 높아 내열 충격성이 양호한 Ti-N 코팅 엔드밀(TiN-HSS,  $\phi 12-4$ flute)을 선정하였다. 가공된 원통형 시험편을 머시닝 센터에 쉽고 정확하게 고정시키기 위하여 지그(jig) 형태의 바이스를 제작 사용하고 다이얼 게이지를 이용해 직각도가  $\pm 0.01$ mm 이내가 되도록 고정하였다. 주어진 절삭조건에 따라 엔드밀을 사용하여 외경 원통면을 가공한 다음 정면밀링커터로 상면을 0.5mm 절삭가공 한다. 이 면을 기준면으로 하여 밑면을 평면 연삭기로 0.2mm 연삭 가공하여 시제품의 평행도와 진직도 공차를  $\pm 0.01$ mm 이내가 되도록 하였다. 엔드밀의 돌출 거리는 어떠한 절삭의 경우에도 같은 조건이 되도록 하기 위하여 밀링척 하단에서부터 엔드밀 끝까지의 거리는 tool pre-setter를 이용하여 항상 일정한 높이  $50 \pm 0.05$ mm가 되도록 공구를 고정하고 좌표계 설정시 엔드밀 높이는 hight pre-setter를 사용하여 항상 일정하게 맞추어 설치하였다. 또한 절삭가공시 공구의 마모에 의한 진원도의 변화를 고려하여 주어진 절삭조건 하에서 동일한 실험이 이루어 질 수 있도록 한 사이클마다 공구를 교환하면서 각각 주어진 절삭조건의 프로그램

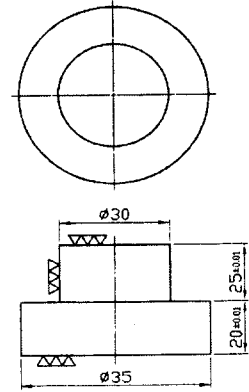


Fig.2 Dimensions of the cylindrical specimen.

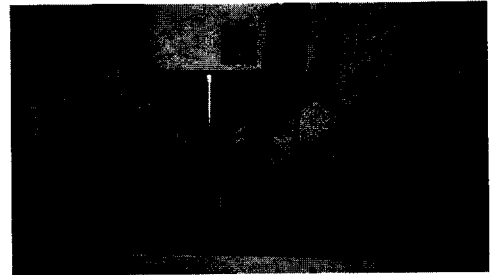


Fig.3 End mill cutting in the vertical spindle type machining center.

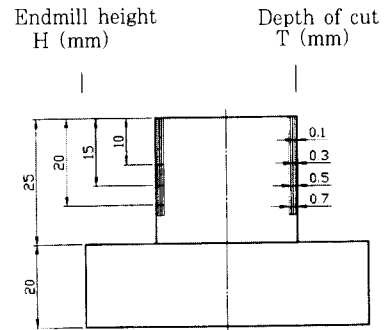


Fig.4 Schematic diagram of the depth of cut(T) and end mill height(H) for the cutting condition.

으로 실험을 수행 하였다. Fig.4는 시험 원통면에서 가공 조건인 엔드밀의 절삭깊이(T)와 가공시 엔드밀의 높이

Table 1 Specification of Machining Center TONGIL (TNV-40A).

travel x,y,z-axis	560, 410, 510 mm
spindle speed	60 - 6000 rpm
taper	NT No. 40
motor power	A.C 7.5 / 5.5 kW
feed rate	1 - 5000 mm/min
feed motor	A.C 0.9 kW
rapid traverse	12000 mm/min
standard control	FANUC OMC

(H)를 상면에서 아래 방향의 치수로 표시하였다. Table 2의 실험에 사용된 머시닝센터의 가공프로그램을 보여준다. 가공은 비수용성 절삭유를 충분히 공급하면서 가능한 마찰 및 진동에 의해 발생하는 표면형상의 영향을 제거하였다. Fig.3은 실험에 사용된 수직형 머시닝 센터에서 원통시험편의 엔드밀에 의한 위쪽 측면 가공 모습을 보여준다.

Table 2 NC-codes for CW(clockwise) and CCW(counter clockwise) cutting by end mill.

for CCW cutting	for CW cutting
O0001	O0002
G40 G49 G80 :	G40 G49 G80 :
G91 G28 X0. Y0. Z0. :	G91 G28 X0. Y0. Z0. :
G90 G54 :	G90 G54 :
G91 G30 Z0. :	G91 G30 Z0. :
M06 T01 :	M06 T01 :
G90 G00 G43 X30. Y40. Z100. H1: Z-10. M03 S800 :	G90 G00 G43 X30. Y-15. Z100. H1: Z-10. M03 S800 :
G01 G42 X20. Y30. F400 D1 :	G01 G41 X5. Y-5. F400 D1 :
G03 X1.1 Y15. R30. F80 M08 : I13.9 :	G02 X1.1 Y15. R30. F80 M08 : I13.9 :
X3. Y0. R25. :	X3. Y30. R25. :
G40 G00 G49 Z200. M09 :	G40 G00 G49 Z200. M09 :
G91 G30 Z0. :	G91 G30 Z0. :
M06 T02 :	M06 T02 :
G90 G00 X-60. Y15. Z10. :	G90 G00 X-60. Y15. Z10. :
M03 S500 :	M03 S500 :
Z-0.5 M08 :	Z-0.5 M08 :
G01 X-10. F150 :	G01 X-10. F150 :
G00 Z200. M09 :	G00 Z200. M09 :
M05 :	M05 :
M02 :	M02 :

### 3.2 진원도 측정

본 실험에 사용된 진원도 측정기는 테이블 회전식의 Mitutoyo RA-112 (테이블 회전속도 6 rpm, 측정범위  $\pm 250 \mu\text{m}$ , stylus tip 직경 1 mm, 측정하중 70~100 mN) 이다. 본 장치는 축침 회전식 진원도 측정기와 비교할 때 피측정물의 위치를 바꾸지 않고서 높이가 다른 부분이나 반경이 다른 부분을 쉽게 측정할 수 있는 장점이 있다. 진원도 측정은 먼저 측정기 테이블의 평면도 즉 수평을 L-볼트(수평 조절용 볼트)를 이용하여 정확하게 맞추고 표준 반구를 테이블의 중앙에 올려놓고 C-볼트(센터 조절용 볼트)를 이용하여 범위를 변화시키면서 중심 센터

를 정확하게 맞춘다. 다음으로 시험편을 테이블의 중앙에 올려놓은 후 측정범위를  $\pm 250 \mu\text{m}$ 에서부터 시작하여 점점 낮은 범위로 선정하고 그때마다 테이블을 회전시키면서 C-볼트를 이용하여 정확하게 시험편의 센터를 맞춘다. 이때 측정위치는 엔드밀 절삭높이(H)의 중간높이(H/2)로 항상 일정하게 맞추고 측정 파라미터, S/W필터, 테이블 회전 방향, 모드선택 <LSC : least squares circle> 등을 설정하여 Fig.5와 같이 측정결과가 얻어진다.

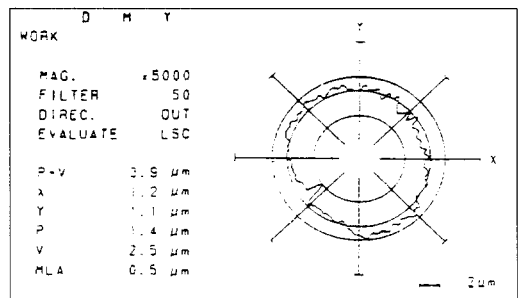


Fig.5 An example of measured data by the roundness tester.

## 4. 실험 결과 및 분석

머시닝 센터를 이용한 SM20C 원통 시험편의 절삭실험에서 주어진 절삭조건, 절삭깊이(T), 이송속도(F), 엔드밀 높이(H) 및 회전수(N)의 변화에 따라 실험된 결과를 정리하였다. Table 3에 표기한 진원도( $5.7 \mu\text{m}/6.6 \mu\text{m}$ )의 상단부 값은 반시계방향 절삭에 의한 진원도 값을, 하단부의 값은 시계방향 절삭에 의한 진원도를 나타낸 것이다.

### 4.1 절삭깊이에 따른 영향

원통시험편의 가공 후 측정된 Table 3의 진원도 값으로 엔드밀 높이(H), 회전수(N), 이송속도(F) 및 절삭방향의 조건을 일정하게 하고 절삭깊이(T)를 X축 진원도 값을 Y축으로 하여 그래프로 나타내면 Fig.6-8과 같다. Fig.6에서 보면 절삭깊이 0.3mm 이하에서는 진원도 값이 절삭깊이의 증가에 따라 완만한 증가 추세를 보이고 0.3mm 이상부터는 진원도 값이 급격히 증가한다. 이러한 현상은 회전수 800rpm

일 때보다 1000rpm에서, 또한 반시계방향 절삭보다 시계방향 절삭에서 더욱 뚜렷하게 나타나며 Fig.7.8에서도 같은 현상을 발견할 수 있다. 절삭깊이 0.3mm 이하에서 이송속도 100mm/min인 경우가 이송속도 80mm/min 또는 120mm/min일 때보다 진원도 값이 양호하고 0.3mm 이상에서는 엔드밀 높이, 이송속도 및 회전수의 증가에 따라 진원도 값이 비례적으로 증가하고 있으며 절삭깊이가 커질수록 반시계 방향 절삭 보다 시계방향 절삭에서 더욱 분명하게 나타난다. 절삭깊이 0.3mm이하에서는 시계방향과 반시계방향 절삭의 차이가 크지 않으나 0.3mm 이상부터는 회전수 800rpm일 때보다 회전수가 1000rpm일 때 시계·반시계방향 절삭의 차이가 크게 나타나고 절삭깊이와 엔드밀 높이가 커질수록 이송속도가 빠를수록 그 차이는 더욱 커진다.

Table 3 The measured roundness in various machining conditions.

H: End mill height, F: Feed rate (mm/min),  
N: Revolution, T: Depth of cut per min.

		T1=0.1(mm)		T2=0.3(mm)		T3=0.5(mm)		T4=0.7(mm)	
		N <sub>1</sub> =800		N <sub>2</sub> =1000		N <sub>3</sub> =800		N <sub>4</sub> =1000	
		N <sub>1</sub> =800	N <sub>2</sub> =1000	N <sub>3</sub> =800	N <sub>4</sub> =1000	N <sub>3</sub> =800	N <sub>4</sub> =1000	N <sub>3</sub> =800	N <sub>4</sub> =1000
H <sub>1</sub> =10 (mm)	F=80	5.7 6.6	5.4 6.0	7.3 7.6	6.2 7.2	9.6 9.8	9.2 10.9	11.2 12.7	11.7 16.9
	F <sub>1</sub> =100	5.4 6.3	5.2 5.8	7.1 7.3	5.9 6.8	10.5 10.9	9.6 11.6	12.3 14.2	12.7 17.6
	F <sub>1</sub> =120	5.8 6.5	5.4 6.3	7.4 7.5	6.4 7.1	11.0 11.5	10.5 12.3	13.8 15.0	14.3 18.6
H <sub>2</sub> =15 (mm)	F <sub>1</sub> =80	5.6 6.4	5.2 5.7	7.1 7.8	6.0 6.9	10.2 10.6	9.7 11.1	12.5 13.1	13.2 17.3
	F <sub>2</sub> =100	5.3 5.8	5.1 5.5	7.0 7.5	5.8 6.5	11.0 11.2	10.3 11.9	13.6 14.5	14.3 18.2
	F <sub>3</sub> =120	5.5 6.2	5.4 6.0	7.5 8.0	6.5 7.0	11.3 11.8	11.1 12.6	14.6 15.4	15.0 19.0
H <sub>3</sub> =20 (mm)	F <sub>1</sub> =80	5.8 6.4	5.4 6.4	7.7 8.2	6.6 7.6	10.9 11.4	10.5 13.4	13.5 15.1	14.4 18.4
	F <sub>2</sub> =100	5.4 6.0	5.3 6.0	7.6 7.9	6.3 7.3	11.6 12.1	11.5 14.1	14.4 16.0	15.7 19.3
	F <sub>4</sub> =120	6.0 6.3	5.5 6.5	8.2 8.4	6.9 7.9	12.4 12.5	11.9 14.4	15.5 16.8	17.2 19.9

※ 5.7 / 6.6 → The roundness value by CW cutting (μm)  
 ↳ The roundness value by CCW cutting (μm)

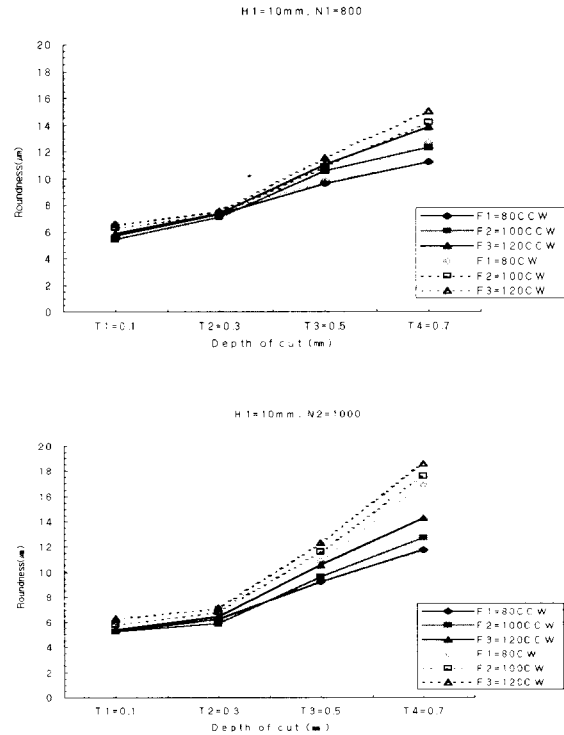


Fig.6 Effect of depth of cut on the roundness values at constant end mill height, H1=10mm and feed rates (F).

절삭깊이 0.3mm 이하에서는 이송속도, 엔드밀 높이, 회전수 및 시계·반시계방향 절삭에 관계없이 진원도 값은 큰 변화가 없다. 그러므로 양호한 진원도 값을 얻으려면 절삭깊이를 0.3mm 이하로 하는 것이 중요하고 절삭깊이가 이 값보다 커지면 진원도 값이 급격히 증가하여 진원도가 떨어지는 현상이 나타나므로 절삭깊이가 진원도 값의 변화에 미치는 영향이 다른 어떤 절삭조건보다 크다는 사실을 알 수 있다.

#### 4.2 이송속도에 따른 영향

Table 3의 진원도 측정값에서 엔드밀의 절삭깊이(T), 회전수(N) 및 절삭방향을 일정하게 하고 이송속도(F)를 X축 진원도 값을 Y축으로 하여 그린 그래프가 Fig.9-10이다. 결과에서 보면 절삭깊이가 0.3mm 이하 일 때 이송

속도는 진원도 값의 변화에 큰 영향이 없었으며 이송속도 100mm/min에서 진원도 값이 가장 양호하며 회전수 800rpm보다 1000rpm일 때

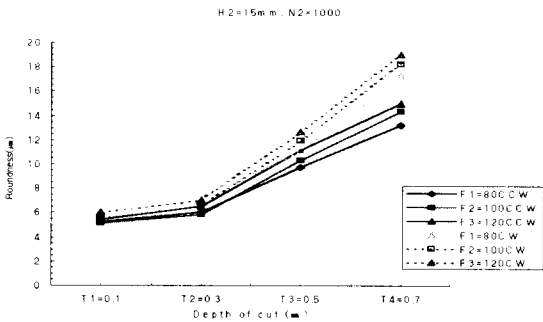
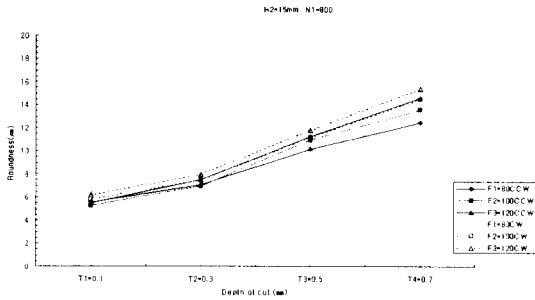


Fig.7 Effect of depth of cut on the roundness values at constant end mill height, H2=15mm and feed rates (F).

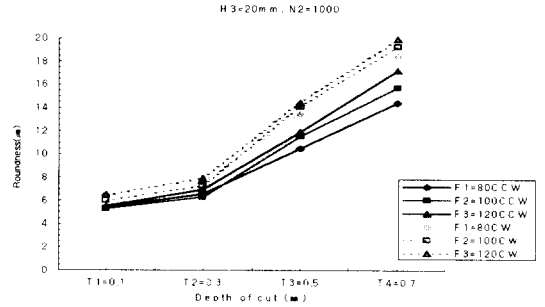
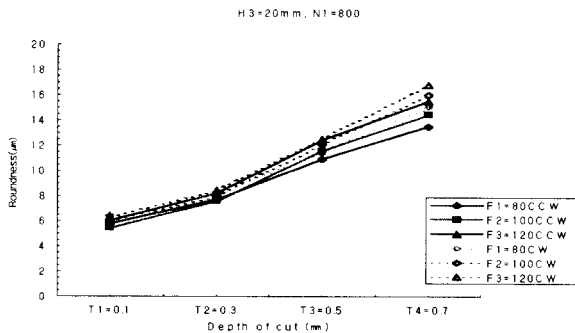


Fig.8 Effect of depth of cut on the roundness values at constant end mill height, H3=20mm and feed rates (F).

진원도 값은 더 좋게 나타났다. 절삭깊이 0.3mm 이상 일 때는 이송속도의 증가에 따라 진원도 값이 비례적으로 증가하였으며, 시계·반시계방향 절삭의 차이는 절삭깊이가 클수록 크며 회전수 1000rpm에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이것은 절삭깊이가 0.3mm 이상일 때 시계방향절삭은 회전수를 800rpm에서 반시계방향 절삭은 1000rpm에서 이송속도는 80mm/min이하로 가공하는 것이 보다 효과적임을 보여 준다. 절삭방향에 따른 진원도 값의 변화는 각각의 이송속도에 따라 시계·반시계방향 절삭이 뚜렷하게 구분되는 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 반시계방향 절삭에서는 절삭날에 작용하는 초기 절삭력이 작고 절삭력이 점차 증가하지만 시계방향 절삭에서는 절삭날에 작용하는 초기 절삭력이 크고 점차 절삭력이 감소하기 때문에 나타나는 현상으로 보여진다. 절삭깊이가 0.3mm이하 일 때는 이송속도가 진원도 값의 변화에 큰 영향을 미치지 않았으나 그 이상일 때는 이송속도의 증가에 따라 비례적으로 진원도 값이 증가하므로 이송속도는 먼저 절삭깊이를 고려한 후 결정하여야 하며, 이것은 이송속도에 따라 절삭력이 증가하여 발생하는 일반적인 현상(로 보여진다8). 이송은 절삭깊이 0.3mm이하의 경우 회전수 1000rpm, 이송속도 100mm/min으로 하여 반시계방향 절삭을 하고 절삭깊이가 0.3mm이상 일 때는 회전수에 관계없이 이송속도를 80mm/min이하로 하여 반시계방향 절삭을 하는 것이 바람직 한 것으로 나타났다.

### 4.3 엔드밀 높이의 영향

Table 3의 진원도 값으로 절삭깊이(T), 회전수(N), 이송속도(F) 및 절삭방향을 일정하게 하고 엔드밀 높이(H)의 변화에 따른 진원도 값으로 나타낸 그래프가 Fig.11-13이다. Fig.11에서 보면 절삭깊이 0.3mm이하에서는 엔드밀 높이의 변화에 따른 진원도 값의 변화가 크지 않으나 엔드밀 높이 15mm에서는 10mm 또는 20mm일 때 보다 일반적으로 진원도 값이 양호하게 나타난다. 절삭깊이 0.3mm이상에서는 엔드밀 높이의 증가에 따라 비례적으로 진원도 값이 증가하며 절삭깊이가 커질수록 엔드밀 높이의 증가에 따른 진원도 값의 증가 현상은

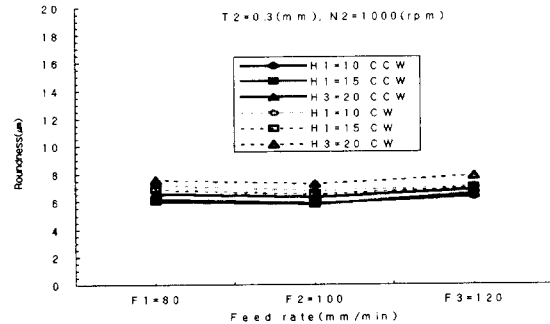
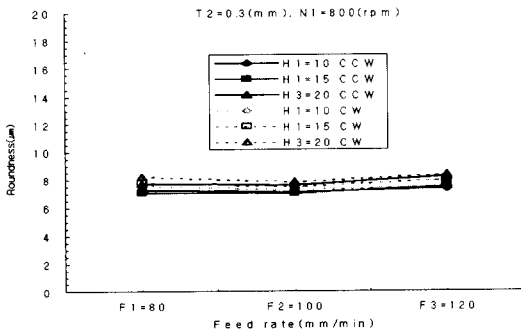


Fig.9 Effect of the feed rate on the roundness values at constant depth of cut, T2=0.3mm and end mill height (H).

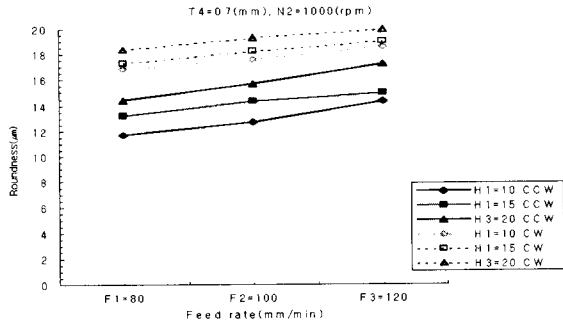
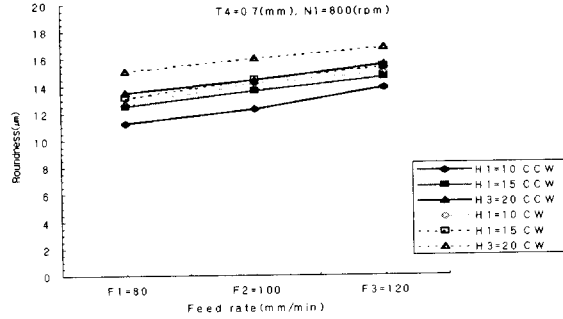


Fig.10 Effect of feed rate on the roundness values at constant depth of cut, T4=0.7mm and end mill height (H).

더욱 두드러지고 회전수가 800rpm일 때 보다 1000rpm일 때, 반시계방향 절삭보다 시계방향절삭에서 더욱 뚜렷하게 나타나며 이것은 Fig.12,13에서도 같은 현상임을 알 수 있다. 엔드밀 높이 15mm, 절삭깊이가 0.3mm 이하에서 이송속도 100 mm/min, 회전수 1000rpm으로 반시계방향 절삭을 할 때 가장 양호한 진원도 값을 얻을 수 있음을 보인다. 절삭깊이가 0.3mm 이상 일 때는 절삭깊이가 커지고 이송속도가 빠를수록 엔드밀 높이의 변화에 따른 진원도 값의 변화는 비례적으로 증가하며, 이러한 현상은 반시계방향 절삭보다 시계방향 절삭에서 더 잘 나타난다. 엔드밀 절삭높이가 클수록 절삭 저항이 증가하여 진원도 값이 나빠지는 것이 일반적인 현상이나 절삭깊이 0.3mm이하에서는 엔드밀의 절삭높이는

진원도 값의 변화에 큰 영향을 미치지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 보다 양호한 진원도 값을 얻기 위해서는 절삭깊이를 0.3mm이하로 하고 이때엔드밀 높이의 영향은 크지 않으므로 이송속도100mm/min, 회전수 1000rpm, 반시계방향으로 절삭하는 것이 바람직한 것으로 보여진다.

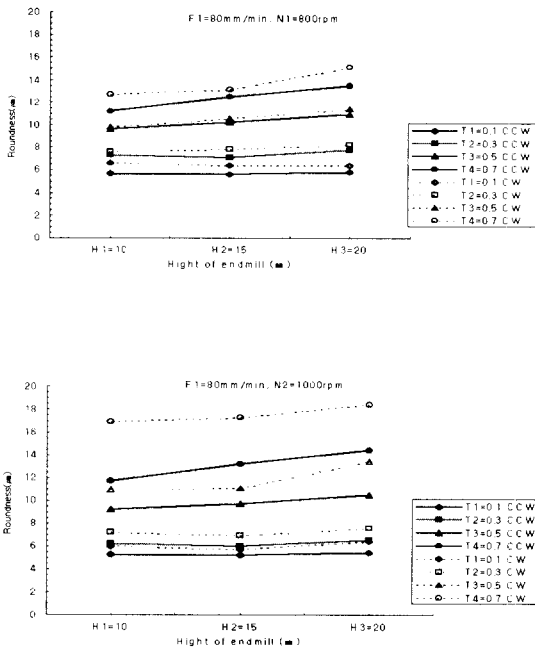


Fig.11 Effect of height of end mill on the roundness values at constant feed rate, F1=80mm/min and depth of cut (T).

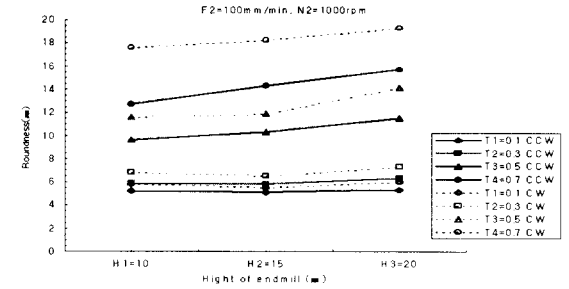
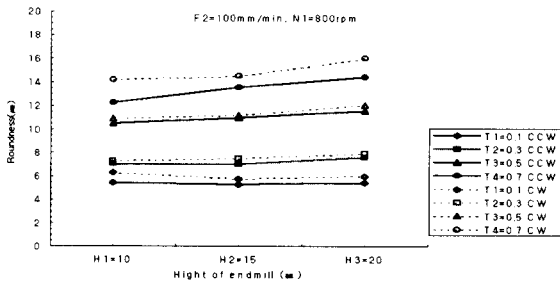


Fig.12 Effect of height of end mill on the roundness values at constant feed rate, F2=100mm/min depth of cut (T).

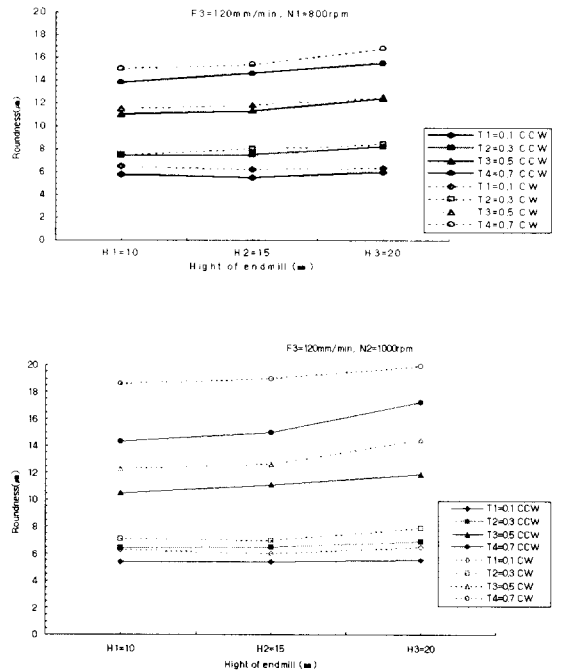


Fig.13 Effect of height of end mill on the roundness values at constant feed rate, F3=120mm/min depth of cut (T).

### 5. 결론

기계 구조용 탄소강인 SM20C를 수직형 머시닝 센터에서 Ti-N 코팅 엔드밀(φ12-4flute)을 사용하여 회전



수, 이송속도, 절삭깊이, 엔드밀 높이 등을 변화에 따른 시계방향·반시계방향의 원통 가공실험에서, 시험 원통의 진원도를 측정된 데이터 분석으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 절삭깊이가 진원도 값의 변화에 미치는 영향은 다른 절삭조건(이송속도, 엔드밀 높이, 회전수)이나 절삭방향의 영향보다 월등히 크다.
- 2) 절삭깊이가 작으면 이송속도는 진원도 값의 변화에 큰 영향을 미치지 않으나 절삭깊이가 크면 이송속도의 증가에 따라 진원도 값이 급격히 증가하므로 이송속도는 절삭깊이를 고려하여 결정하여야 한다.
- 3) 원통을 같은 절삭조건에서 반시계방향으로 절삭하면 시계방향 절삭보다 절삭깊이가 작은 경우는 2~4%정도, 절삭깊이가 큰 경우는 20~30%정도 향상된 진원도 값을 얻을 수 있으므로 반시계방향 절삭이 효과적이다. 이것은 원통 절삭에서 스피들 회전방향이 가공방향과 반대가 되는, 즉 상향절삭으로 되어 가공표면이 향상되는 것으로 예상된다.
- 4) 엔드밀에 의한 원통 가공에서 가장 양호한 진원도 값을 얻으려면 절삭깊이를 작게 하고 이송속도는 100mm/min, 회전수 1000rpm으로 반시계방향 절삭을 하는 것이 바람직하다.

## 참고문헌

1. 최호선, "公差論", 성안당, 1996.
2. 박원규, 현동훈, "최신 CNC 가공", 청문각, 1994.
3. 서남석, "金屬切削理論", 東明社, 1985.
4. 정명세, 원종욱, 임태봉, "Measure of roundness", 한국표준연구소, 1984.
5. 한정림, 김평길, 김종성, "정밀측정공학", 機電研究社, 1980.
6. 박성준, "The study on rotational error and roundness in cylindrical plunge grinding", 석사학위 논문, 연세대학교, 1995.
7. 명철호, "머시닝센터에서 2.5次元과 3次元 球面加工에 관한 比較 研究", 석사학위논문, 충북대학교, pp. 3-10, 1996.
8. 황경충, 최원식, 윤종호, "CNC에 의한 SM45C 절삭시 절삭성능 평가", 한국공작기계학회지, 7권, 4호, pp.104-116, 1998.