

# 머시닝센터에서 볼 엔드밀가공으로 고능률, 고정밀도 제고를 위한 표면가공 조건

윤종학\*, 이종원\*\*, 정기영\*\*\*, 정문섭\*\*\*

## Cutting Condition for Improving Cutting Efficiency and Accuracy by Ball Endmill on a Machining Center

Yoon-Jong Hak\*, Lee-Jong Won\*\*, Jung-Ki Young\*\*\*, Jung-Mun Sup\*\*\*

### Abstract

The curved surface machined by plate end mill causes a excess non-cutting volume, in these cases ball end mill is used for the curved surfaces. This study is aimed to obtain the optimum cutting condition by measuring the surface roughness on the conditions of various cutting speed, table speed, tool diameter, radius of curvature when machining the curved surface using the ball end mill.

After designing curve rates, obtaining NC data by CAD/CAM system through CC-Cartesian method and transferred the data through DNC system, we machined the specimens by the CNC machining center.

The surface roughness of specimens was measured by surface roughness tester and CNC 3D coordinate measuring machine.

The cutting condition were the same as follow, velocity; 15, 20, 25, 30m/min, feed rate: 40, 60, 80, 100m/min amd radius of curvature: 30, 40, 50, 60mm, tool diameters:  $\phi 8$ ,  $\phi 12$ ,  $\phi 16$ ,  $\phi 20$ mm.

Analizing the working results, we can acquire the optimum cutting condition of curved specimen at the cutting velocity of 20~25m/min and the feed rate of 80mm/min. As the same cutting condition, the best surface roughness was showed at  $\phi 16$ mm of the tool diameter.

But the tool diameter was smaller than  $\phi 8$ mm, we could improve for the surface roughness by controlling the cusp.

Keyword : Plate End Mill(평 엔드밀), Ball End Mill(볼 엔드밀), Optimum Cutting Condition(최적 절삭 조건), Curvature(곡률), CC-Cartesian(직각좌표계에 따른 공구경로 파일 생성법), Surface roughness(표면 거칠기)

\* 서울산업대학교 기계공학과 교수

\*\* 경기기계공업고등학교 교사

\*\*\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

## 1. 서 론

현대는 TV수상기나 전화기와 같은 가전 제품 뿐 아니라 자동차 부품, 항공기 부품까지도 외형을 자유 곡면으로 만들어 미적 감각을 높혀 주고 있다. 이들 자유곡면은 일반적으로 CAD/CAM 시스템에서 출력된 CNC 절삭경로를 따라 밀링 가공으로 절삭된다. 여기에 주로 사용되는 공구는 볼 엔드밀이다. 전통적으로 곡면을 절삭하는 방식은 모방 밀링 방식에서 출발하였기 때문에 형상을 상사시킨 볼 엔드밀 공구가 보편화되어 왔지만, 이는 기하학적인 보정위치 산출방법상의 편리성에 기인한 것으로 절삭성능은 평엔드밀보다 일반적으로는 좋지 못하다.<sup>[1,2]</sup> 또한 볼 엔드밀은 평엔드밀에 비하여 정점부에서 비정상 절삭이 일어나기 때문에 공구의 마멸이나 파손이 크고 기하학적 절삭 작용도 다양해 진다.<sup>[3,4]</sup> 머시닝센터를 이용한 고정밀 가공에 필요한 공구와 재료가 다양하므로 최적의 절삭 조건을 선정할 필요가 있다. 절삭시 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 절삭 속도, 이송 속도, 공구 지름<sup>[5]</sup> 등을 들 수 있다. 芹澤 喬<sup>[6]</sup>은 절삭공구의 이송에 따른 표면 거칠기를 연구한 결과에서 공구의 이송이 빠를수록 표면 거칠기가 나쁘다는 것을 밝힌바 있다. 표면 거칠기에 진동 특성을 고려한 연구에는 中山一雄<sup>[7]</sup>가 있다. 그는 공작기계의 정밀도와 탄성변형, 공작물의 재질, 특히 절삭저항과 절삭열 등에 의해 표면 거칠기는 크게 영향을 받는다고 하였다. 본 연구에서는 직각좌표계에 따른 공구 경로 화일 생성법에 의한 프로그램(CC-Cartesian)을 사용하여 기계구조용 탄소강인 SM45C를 볼 엔드밀로 곡면 가공 할 때 가장 좋은 표면 거칠기와 형상을 갖는 최적의 절삭 조건과 범위를 실험적으로 구해서 엔드밀에 의한 정밀도 제고를 위한 최적의 표면 가공 조건을 결정함으로써 가공능률을 향상 시키는데 본 연구에서의 연구 목적으로 한다.

## II. 실험 장치 및 실험 방법

### 1. 실험 장치 및 절삭 공구

#### (1) 실험 장치

본 실험에 사용된 장치 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Instrument and specification

Instrument	Company	Specification
Machining Center	TONGIL(Korea)	TNV-50, 1200×400×500 (mm)
Software	DELCAM (England)	DUCT 5.2
DNC System	TURBOTECH (Korea)	DX-1000
Surface roughness tester	MITUTOYO (Japan)	Driver speed : 0.1, 0.2, 0.5, 1mm/s Measuring range : 8, 80, 600 $\mu$ m
3D-Coordinate Measuring Machine	DUKIN(Korea)	400×500×300(mm)

#### (2) 절삭 공구

본 실험에서 사용된 절삭 공구는 고온경도가 높고 내마모성이 큰 SKH51  $\phi$ 8,  $\phi$ 12,  $\phi$ 16,  $\phi$ 20mm의 고속도 공구강이다. 공구의 주요 제원은 Fig. 1, Table 2와 같다.

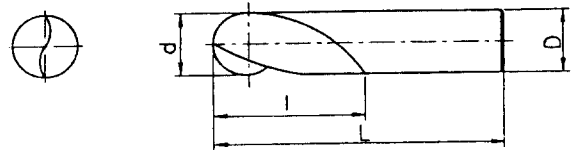


Fig. 1 Dimensions of ball-endmill

Table 2 Specifications of ball-endmill

Diameter(mm) (D)	Total length(mm) (L)	Flute length(mm) (l)	Helix angle(deg.)
$\phi$ 8	100	14.0	30
$\phi$ 12	110	22.0	30
$\phi$ 16	140	30.0	30
$\phi$ 20	160	38.0	30

#### (3) 실험용 피삭재

본 실험에 사용한 재료는 KSD 3752에 규정된 기계구조용 탄소강(SM45C)으로서 시험편의 크기는 25×30×30mm로 하였으며 재료의 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 3 Chemical composition (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.46	0.25	0.75	0.02	0.04	0.09	0.02	98.36

Table 4 Mechanical properties of workpiece materials

Hardness (H <sub>B</sub> )	217
Tensile strength (Kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	63
Elongation (%)	19
Yield strength (Kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	36.4

## 2. 실험 방법

CAD/CAM 프로그램으로 곡면을 모델링한후 NC 데이터를 생성, 이 데이터를 DNC장치를 이용하여 머시닝센터에서 볼 엔드밀로 가공하였다. 이때 최적의 절삭 조건을 얻기 위해 가공물의 곡률, 절삭 속도, 이송 속도, 공구 지름 등의 절삭 조건을 달리하였다. 또한 공구 마모에 따른 오차를 줄이기 위하여 매 실험마다 새 공구를 사용하였고, 칩의 관찰에 의한 절삭력을 줄이기 위하여 비수용성 절삭유를 사용하였다. 본 실험에 적용된 절삭 조건은 Table 5와 같다.

가공된 시편의 표면 거칠기는 접촉식 촉침 측정 장치로 측정하였다. 시험편은 기준 길이를 2.5mm로 하여 연속 7.5mm, 촉침 속도는 1mm/sec로 하였으며 상하범위(range)는 80 $\mu$ m로 하여 중심선 평균 거칠기(R<sub>a</sub>)값으로 나타내었다. 또한 형상 측정은 3차원측정기를 이용하여 각 곡면에 대한 곡률의 변화값을 측정하였다.

Table 5 Summary of cutting conditions

Cutting speed (m/min)	Table speed (mm/min)	Curvature of radius (mm)	Tool diameter (mm)	Tolerance (Cusp)
15	80	50	8,12,16,20	0.01 (0.001)
20				
25				
30				

Cutting speed (m/min)	Table speed (mm/min)	Curvature of radius (mm)	Tool diameter (mm)	Tolerance (Cusp)
25	40	50	8,12,16,20	0.01 (0.001)
	60			
	80			
	100			
25	80	30	8,12,16,20	0.01 (0.001)
		40		
		50		
		60		

## III. 실험 결과 및 고찰

Table 5에 제시된 절삭 조건에 따라 곡면의 표면 거칠기를 관찰하기 위하여 CAD/CAM 시스템으로 실험을 하였다. 실험은 정밀 가공에 필요한 허용공차 범위내에 들도록 공차(tolerance)를 0.01mm, 커슁(cusp)을 0.001mm로, 곡률 반경은 R50mm, 공구 지름은 각각 8mm, 12mm, 16mm, 20mm로 하였다. Fig. 2는 위의 조건에서 이송 속도 80mm/min으로 하였을 때 절삭 속도의 변화에 따른 표면 거칠기<sup>8)</sup>로 절삭 속도가 20~25m/min에서 가장 좋은 결과를 나타내었고, 그 외의 속도에서는 거칠기 값이 점차 커지는 경향을 나타냈다.

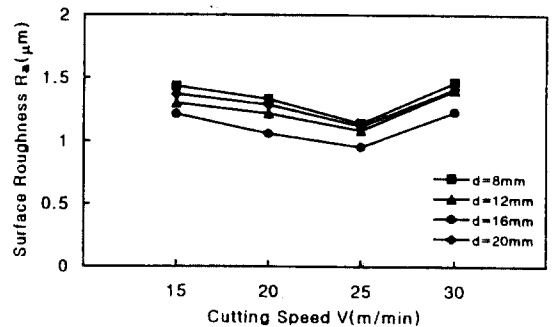


Fig. 2 Effect of the cutting speed on the surface roughness at each tool diameter

그림에서 절삭 속도가 이 범위를 벗어나면서 거칠기가 불량해지는 것은 절삭 저항중 각 분력간의 크기에 큰 차이가 나타나지 않고 구성인선이 소멸되지도 않으며 절삭 저항의 감소에<sup>9)</sup> 의한 표면 거칠기의 개선에도 크게 도움이 되지 않는데 비하여 엔드밀은 회전수의 증가로 절삭열이 높아지면서 열 팽창과 인선의 마모가 빠르게 진행되고<sup>10)</sup>

가는 지름의 공구와 마찬가지로 떨림이 발생하여<sup>[11]</sup> 표면 거칠기는 오히려 나빠지고 있는 것으로 판단된다.

곡면 절삭시 공구 지름이 거칠기에 미치는 영향은 같은 커스(cusp)이 존재 되었을 경우 어느 정도까지(16mm)는 지름이 클수록 거칠기 값이 좋아지는 것으로 나타나고 있으나 이 한계를 벗어나게 되는 경우(20mm) 볼 엔드밀의 선단은 볼지름이 커짐에 따라 실질적인 절삭이 이루어지지 못하고 문지름 현상(rubbing)이 발생되어 거칠기 값이 현저하게 커지는 결과로 나타나고 있다. 따라서 곡면 가공시 공구의 지름은 어느 한도 내에서만 거칠기가 향상되는 것으로 판단된다. Fig. 3은 이송 속도와 공구의 지름변화에 따른 표면 거칠기 관계를 나타낸 것으로 60~80mm/min 구간에서는 거칠기의 변화가 크지 않았으나 80mm/min을 초과하여 100mm/min에 접근할수록 급격하게 상승하고 있다. 이와같은 현상은 여러가지 원인이 있겠으나, 이송 속도가 빨라지면서 공구와 재료사이에 마찰과 떨림이 증가하기 때문으로 생각된다. 한편 이론식에 의하면 이송량이 작아질수록 거칠기는 좋아지게 되어 있으나, 그 한계가 존재한다고 판단된다. 이송 속도가 극히 작아지면 구성인선이 생성되는 한계 절삭 속도는 오히려 높아지고, 이상적인 이송 속도가 보장될 수 없게 되므로 거칠기는 이상치에서 벗어나게 된다고 생각된다.<sup>[9]</sup> 이송 속도가 커지면 절삭 저항이 급격히 커지나 이송 속도가 작을 때는 절삭저항의 변화가 거의 없으며 이송 속도에 의한 거칠기에 미치는 영향보다 공구의 마모에 의한 거칠기의 영향이 크게 작용하기 때문에 발생되는 현상으로 보인다.

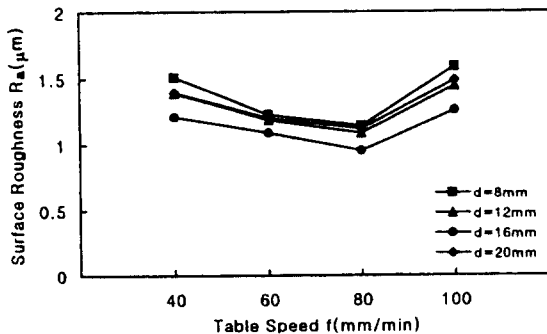


Fig. 3 Effect of the table speed on the surface roughness at each tool diameter

Fig. 4는 곡률 반경의 변화에 따른 거칠기를 공구 지름과 관계시켜 나타낸 것이다. 거칠기는 곡률 반경 50mm에서 가장 양호한 상태를 나타내고 있는데, 이와같은 원인은 곡률 변화에 따라 절삭되는 시험편의 경사각이 다르고 절삭량의 변화로 절삭저항이 증가하기 때문이라고 생각된다.

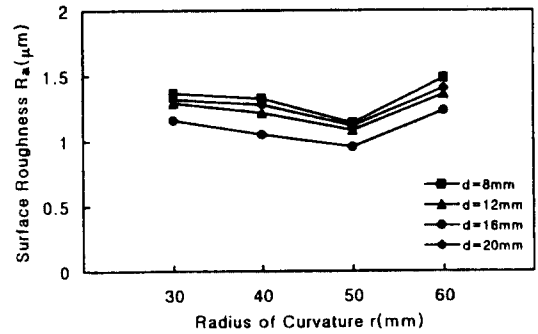


Fig. 4 Effect of the radius of curvature on the surface roughness at each tool diameter

Fig. 5는 절삭 속도에 따른 곡률의 변화값, 즉 곡면 가공에 중요한 인자로 인식되고 있는 형상 오차의 크기를 보여주고 있다. 이는 절삭 속도가 증가함에 따라 곡률의 변화량이 조금씩 작아 지는데 25m/min일 때 가장 좋은 결과를 보여주며, 30m/min일 때 곡률이 다시 커지고 있다. 따라서 곡률의 변화도 거칠기와 같이 절삭 속도가

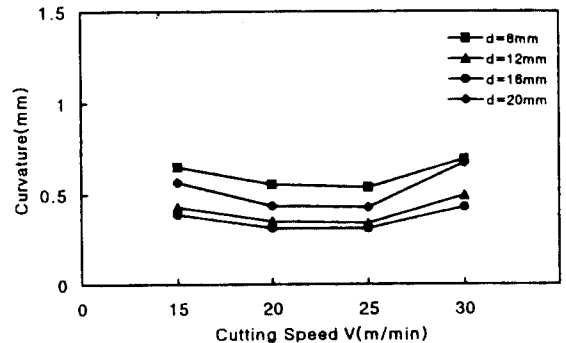


Fig. 5 Effect of the cutting speed on the curvature tolerance at each tool diameter

빨라지면 절삭 저항이 감소하여 좋은 결과를 얻을 수 있지만 적정 절삭 속도를 초과하게되면 회전수의 증가와 공구의 떨림<sup>(11)</sup> 등이 원인이 되어 결과가 나쁘게 나타나는 것으로 보여진다.

Fig. 6는 이송 속도에 따른 공구 지름과 곡률의 변화를 나타낸 것으로 이송 속도가 커질수록 곡률 변화도 커지는 것으로 나타나고 있다. 표면 거칠기에서 나타나고 있는 바와 같이 이송 속도가 커지면 절삭 저항이 급격히 커지고 가공 오차마저 커지게 된다.

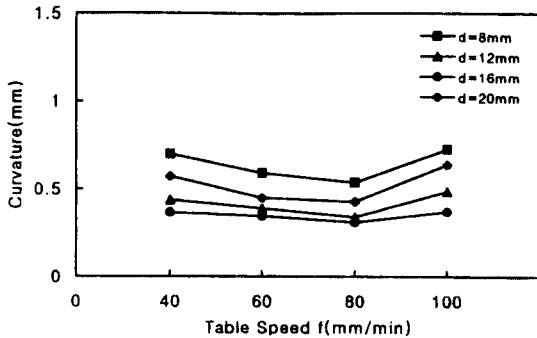


Fig. 6 Effect of the table speed on the curvature tolerance at each tool diameter

### V. 결론

본 연구는 정밀도 제고를 위하여 볼 엔드밀에 의한 곡면 가공에서 최적의 표면 거칠기값인 커슁(cusp)의 최소값, 즉 양호한 절삭 상태로 되는 절삭 조건을 구하기 위해 절삭 속도는 15, 20, 25, 30m/min, 이송 속도는 40, 60, 80, 100mm/min, 공구 지름은  $\phi 8$ ,  $\phi 12$ ,  $\phi 16$ ,  $\phi 20$ mm, 곡률 반경은 R30, R40, R50, R60으로 바뀌가며 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 절삭 조건으로 공구 메이커가 추천하는 적정 절삭 속도 영역인 20~25m/min에서 실험한 결과 이송 속도가 80mm/min, 곡률 반경이 50mm일 때 표면 거칠기는 가장 양호한 상태로 되었다.
- (2) 위와 같은 절삭 조건에서 공구 지름은 16mm일 때 가장 안정된 가공면을 얻을수 있었다. 이와같은 결과는 문지름 현상(rubbing)이나 작은 지름의 떨림이 생기지 않는데 기인한다고 생각된다.

- (3) 공구 지름이 작은 8mm에서는 큰 표면 거칠기 값을 나타냈으나, 더 적은 커슁을 적용함으로써 표면 거칠기를 개선할 수 있었다. 이것은 절삭량을 줄임으로써 커슁이 작아지고 공구가 받는 절삭 저항이 작아지기 때문인 것으로 분석된다.

이러한 결과들을 종합해 보면, 곡면 가공시 표면 거칠기를 좋게 하기 위해서는 절삭 속도, 이송 속도, 공구 지름과 같은 절삭 조건을 조화있게 조정하여야 하며, 가공 능률 또한 높일 수 있다고 생각된다.

### 참고 문헌

1. 맹회영, "최대경사방향 트리를 이용한 삼각형 요소화 곡면모델의 NC 엔드밀링가공에 관한연구," 대한기계학회논문집 제19권 제9호, pp. 2089-2104, 1995.
2. Vickers, G.W. and Quan, K. W., "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, No. 5, pp.424-431, 1989.
3. Duncan, J. P. and Mair, S. G. "Sculptured Surfaces in Engineering and Medicine" Cambridge Univ. Press, 1983.
4. Choi, B. K. "CAD/CAM Technology for the NC Machining of the Die Cavities," Vol. 2, KAIST, 1987.
5. 機械工作法, 日本 機械學會 發行, pp. 33-38, 1986.
6. 芹澤 喬, "切削仕上面の性質," 機械の研究, Vol.14, No.8, pp.390-396, 1962.
7. 中山一雄, "切削仕上面の生成と加工精度," 精密機械, Vol. 40, No.3, pp.269-274, 1974.
8. 具慈福, "表面 거칠기 測定 理論과 實際," 中小 企業 振興公團, PP.27~46, 1992.
9. 芹澤 喬, "切削技術の研究(切削仕上面あらさと構成刃先)" 機械の研究, Vol.16, No.10, pp.1271-1274, 1964.
10. 中山一雄, "切削仕上面の生成と加工精度," 精密機械, Vol. 40, No.3, pp.269-274, 1974.
11. Tlustý J. and Macneil P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol.21, pp.21-25, 1975