

볼엔드밀에 의한 경사면 가공시 절삭력 및 가공 오차에 관한 연구

두 승*, 홍주원*, 서남섭**

A Study on the Cutting Force and Machining Error on the Inclined Plane in Ball-end Milling

Seung Doo*, Joo-Won Hong*, and Nam-Sub Suh**

ABSTRACT

In modern manufacturing, many products that have geometrically complicated features, including three-dimensional sculptured surfaces, are being designed and produced to meet various sophisticated functional specifications. The cutting force is required not only for the design of machine and cutting tools, but also for the determination of the cutting conditions for the various machining operations. The ball-end mill is deflected by the cutting force and, the tool deflection is one of the main reasons of the machining errors on a free-form surface. Hence, The cutting force generated in the ball-end milling is the most important property of the machining.

The purpose of this study is to find the characteristics of the cutting force in inclined plane and the resultant machining errors in the ball-end milling process. Although the depth of cut is constant in the inclined plane, the cutting force area varies due to the hemisphere of the ball-end mill.

Key Words : Tool deflection(공구변형), Machining error(가공오차), Cutting force(절삭력), Up-cutting(상향절삭), Down-cutting(하향절삭), Upward-cutting(상방향절삭), Downward-cutting(하방향절삭)

1. 서론

근래에 제품의 품질향상에 대한 높은 관심으로 정밀절삭가공에 대한 많은 노력이 행하여지고 있으며, 볼엔드밀 절삭에서도 가공정도 향상을 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 절삭력 예측⁽¹⁾⁽²⁾, 런아웃(run-out)⁽³⁾, 공구변형(tool deflection)⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 가공경로 등의 연구를 들 수가

있다.

볼엔드밀링은 평엔드밀링이나 정면밀링과 비교하여 가공시간이 매우 길고, 사용되는 커터의 직경이 극히 제한되며, 공구의 절삭부가 입체적인 반구형태라는 형상특성으로 인하여 강성이 저하하며, 공구 정점부에서는 절삭속도가 0이 되어 이론

2001년 1월 26일 접수

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 기계공학부

적으로 절삭이 이루어지지 않는다. 그리고 공작물의 곡면경사와 공구날의 위치에 따라 절삭속도가 변하기 때문에 가공조건 선정이 상당히 어렵다. 자유곡면 가공분야의 생산성이나 품질향상 또는 자동화 성향을 높여주기 위해서는 자유곡면 절삭계에 관한 볼엔드밀의 연구와 그 응용이 매우 시급하다. 또한 볼 형상의 특성상 공구의 중심 날에서의 절삭은 거의 없고, 최외각날에서 큰 절삭을 발휘하게 되는데, 이런 절삭력의 불균직한 형태는 공구의 변형을 일으키고 공구수명을 단축시킨다. 이와 같이 열악한 가공조건에 의해 가공 중에 공구파손, 공구변형, 과부하 등으로 인하여 제품의 형상정밀도 및 표면형상에 나쁜 영향을 미치게 된다.

자유곡면을 가진 금형을 가공할 때는 자유곡면과 공구가 접하는 경사각도 및 절삭깊이 그리고 절삭방향에 따라 볼엔드밀에 작용하는 절삭력, 공구변형 등의 차이가 현저하게 나타난다.⁽⁶⁾ 기존의 연구⁽¹⁾⁽²⁾에서는 자유곡면과 공구가 접하는 경사각 및 절삭깊이에 따라 볼엔드밀의 정점부분이 절삭영역에 포함되는지를 고려하지 않고 자유곡면에서 절삭력에 의한 공구변형을 예측하여 가공경로에 따른 가공오차를 연구하였다.

따라서 본 논문에서는 가공물의 경사각 및 가공방법, 가공경로에 따른 절삭력 특성과 표면거칠기(표면조도), 가공오차를 분석하여 최적의 볼엔드밀 가공조건을 제시하고자 한다.

2. 볼 엔드밀 가공

2.1 공구변형에 의한 가공오차

볼엔드밀 가공으로 형성된 표면에서의 가공오차의 원인으로는 공구변형(tool deflection), 절삭중 발생하는 열, 공작기계의 불안정성 등이며 절삭력에 의한 공구변형을 가공오차의 가장 큰 원인으로 보고 있다. 그러나 볼엔드밀의 공구변형량을 정량적으로 해석하기에는 많은 어려움이 있다. 이는 볼엔드밀이 주로 정삭(finish cutting)에 사용되며 절삭영역이 대부분 공구의 반구부분에 집중하기 때문에 절삭영역을 비롯한 절삭기구가 평엔드밀링에 비해 매우 복잡하기 때문이다.

일반적으로 볼엔드밀링 중의 공구변형량은 공구홀더가 충분히 견고하다는 가정하에 외팔보

(cantilever beam) 이론을 적용한다. Kline⁽⁷⁾은 엔드밀 절삭중의 공구변형모델로 공구의 끝단에서 Z만큼 떨어진 점에 작용하는 수평방향 변형량($\delta(z)$:horizontal tool deflection)을 다음과 같이 근사하여 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F_y}{2ER^4} [(Z_F - Z)^3 - (L - Z)^2 + 3(L - Z)^2(L - Z_F)] \quad (1)$$

여기서 (Fig. 1에서)

Z_F : 절삭력의 중심위치까지의 거리

R : 공구반경, E : 공구의 탄성계수

L : 유효공구길이

F_y : 가공물 표면의 가공오차를 야기하는 절삭력의 수평성분

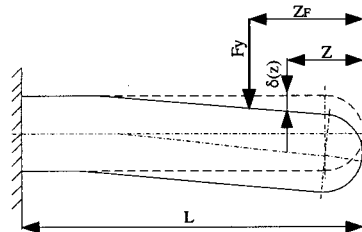


Fig. 1 Deflection of ball-end mill

위 식에서 알 수 있듯이 볼엔드밀 절삭시 발생하는 절삭력에 의해서 공구변형량이 결정됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 해석이 난해한 공간에서의 공구변형보다는 Y-Z의 2차원평면에서 절삭력의 수평성분(F_y) 및 공구변형에 의해 발생하는 가공오차를 분석하였다.

2.2 공작물의 경사각에 따른 절삭깊이 및 유효직경

공구와 공작물이 접촉하여 가공이 이루어지는 공구 부분을 절삭영역이라 한다. 볼엔드밀은 경사면 가공의 경우 공구가 상하방향으로 이동하기 때문에 절삭깊이를 평엔드밀 가공처럼 축방향 절삭깊이로 정의 할 수 없고 가공면에 대한 법선방향으로 절삭깊이를 정의하여야 한다. 또 가공면의 경사각에 따라 공구의 절삭영역이 달라지기 때문에 공작물에 작용하는 절삭 시작점에서의 공구 유효경은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며 가공경로

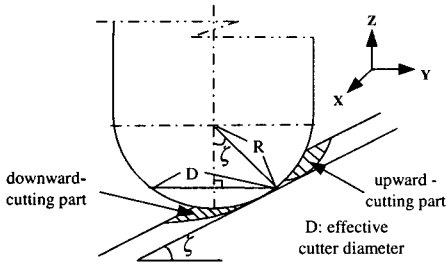


Fig. 2 Comparison of cutting part according to cutting path in ball-end milling

$$\text{유효직경 } (D) = 2R \cdot \sin \zeta \quad (2)$$

에 따라서도 Fig.2와 같이 절삭영역이 이루어지는 공구의 부위가 변한다.

2.3 가공방법 및 가공경로

가공방법 및 가공경로는 Fig.3과 같이 상향절삭(up-cutting)과 하향절삭(down-cutting) 그리고 상방향절삭(upward-cutting)과 하방향절삭(downward-cutting)으로 하였다.

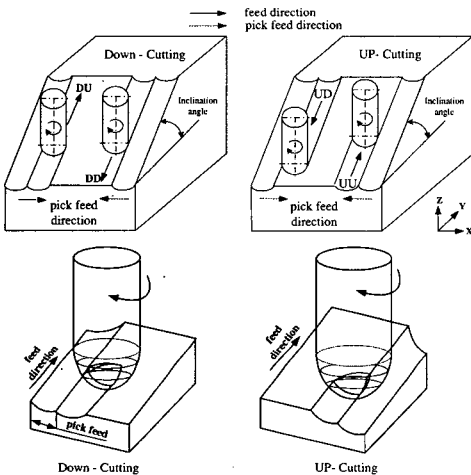


Fig. 3 Workpiece geometry and machining scheme of inclined plane

- DU : down-cutting, upward-cutting
- DD : down-cutting, downward-cutting
- UU : up-cutting, upward-cutting
- UD : up-cutting, downward-cutting

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험은 (주)화천기계의 CNC밀링머신(Hi Super-4)으로 가공하여 절삭력 및 표면조도, 가공오차 등을 측정하였으며 실험장치는 Fig.4와 같다

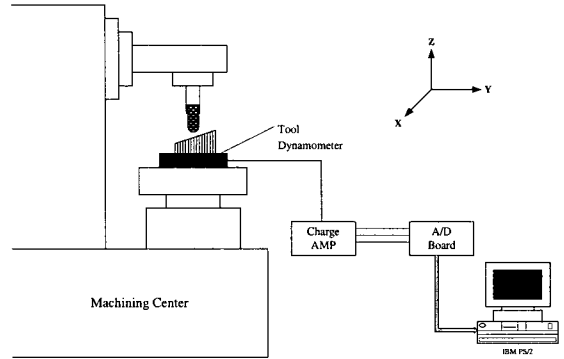


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental device setup

3.2 가공재료 및 공구

실험에 사용된 공작물의 재료는 STD11이며 절삭공구는 지름10mm, 2날, 초경 볼엔드밀(한국야금 SSBE2100)을 사용하였다.

3.3 실험 방법

3.3.1 절삭조건

본 실험에 사용된 절삭조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Machining condition in machining inclined plane

Spindle speed (rpm)	2000
Uncut chip thickness (mm)	0.3
Feed speed (mm/min)	80
Pick feed (mm)	0.3
Surface inclination angle(°)	15 / 45

3.3.2 절삭력 측정실험

가공물의 경사각별 가공경로 및 절삭조건에 따른 절삭특성을 알아보기 위하여 15° / 45° 로 경사진 가공물에 상향절삭-상/하방향(Up-cutting, upward/downward)가공과 하향절삭-상/하방향(Down-cutting, upward/downward)가공을 수행하였다.

절삭력은 Kistler사 Piezo 공구동력계(9257A

type)로 측정된 절삭력 신호를 증폭기(Kistler 5001 type)로 증폭시킨 후 A/D converter를 거쳐 컴퓨터에 저장하였다.

3.3.3 가공오차 및 표면조도 측정 실험

가공물의 경사각이 15° / 45° 인 경사진 평면에서 하향절삭 및 상향절삭으로 각각 상방향과 하방향절삭을 수행하였다. 가공경로의 변화에 따른 표면거칠기를 알아보기 위해 표면조도계 (Mitutoyo, Surftest 201)로 중심선 평균거칠기(Ra)를 Fig.5와 같이 20mm 거리에서 피크피드(pick feed)방향으로 측정하였다. 이때 표면 조도계의 cut-off는 0.8mm 이고 측정의 조도는 0.1S~0.8S, 선단반지름은 5 μm, 하중은 0.5g이다. 또한 절삭력의 변화에 따른 가공오차(machining errors)의 변화를 살펴보기 위해서 절삭 전에 표면 형상을 3차원 좌표 측정기 (coordinate measuring machine; CMM)로 Fig.5와 같이 20mm를 이송방향(feed direction)방향으로 측정 한 다음, 절삭 가공 후 가공 전에 측정했던 동일한 위치를 3차원 좌표 측정기로 다시 측정하여 가공 전후의 차이 값에서 절삭깊이를 빼 값을 가공오차로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 절삭력 특성

가공오차를 발생시키는 여러 요인 중 공구변형이 비교적 큰 영향을 미치며 이러한 공구변형의 주원인이 되는 절삭력의 수평성분 값(F_y)(Fig.5)을 중심으로 비교 분석하였다.

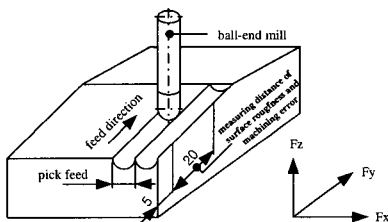


Fig. 5 Coordinate system of cutting force and measuring distance of surface roughness

4.1.1 공작물의 경사각에 따른 절삭력특성

Fig.6과 Fig.7은 Table 1의 절삭조건으로 각각 하향절삭 및 상향절삭으로 가공시 측정된 평균 수평

절삭력(F_y)이다. 가공방향 및 가공경로에 관계없이 경사각이 증가함에 따라 절삭력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 경사각이 증가함에 따라 가공시 공구의 절삭영역은 절삭성이 좋은 공구의 외곽날쪽으로 이동되기 때문에 절삭력이 감소되는 것으로 생각된다. 또한 각 경사각(15° / 45°)의 절삭 시작점에서의 공구유효직경(D)은 식(2)에 의해 각각 2.59mm, 7.07mm로 되며 공구유효직경에 따른 절삭 속도도 각각 16.2 m/min, 44.4m/min로, 경사각이 커짐에 따라 절삭속도가 증가하게 된다. 절삭속도의 증가는 절삭온도의 상승을 유발하여 가공물의 강도가 떨어지고, 공구경사각의 증가 및 칩배출이 용이하여 절삭력이 감소⁽⁸⁾되는 것으로 생각된다.

또 볼엔드밀의 특성으로 공구의 정점에서는 절삭속도가 0이 되어 절삭이 이루어지지 않으며 경

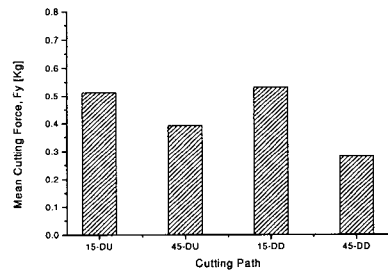


Fig. 6 Comparison of mean cutting force(F_y) due to inclined plane / down-cutting

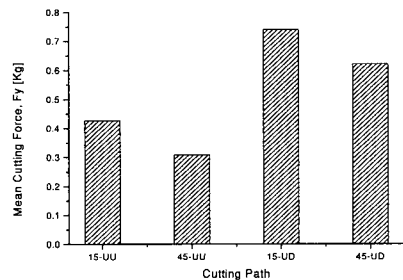


Fig. 7 Comparison of mean cutting force(F_y) due to inclined plane / up-cutting

사각이 작아짐에 따라 절삭이 어려운 공구의 정점 부분이 절삭영역에 포함되어 절삭력이 증대하는 것으로 생각된다.

4.1.2 가공경로에 따른 절삭력 특성

상방향과 하방향의 절삭력의 차이는 절삭영역으로 설명될 수 있으며 절삭영역에 공구정점부의 포함여부를 구분하여 고찰할 필요가 있다.

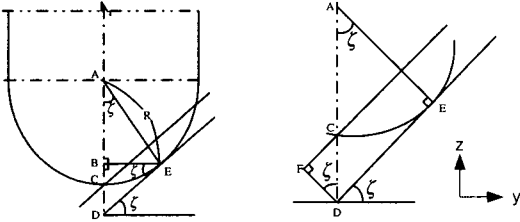


Fig. 8 Geometry of ball-end mill

Fig.8에서 가공시 공구정점부가 절삭영역에 포함되지 않기 위해서는 다음과 같아야 한다.

$$\overline{DF} > \text{미절삭깊이(uncut chip thickness)}$$

그리고 \overline{DF} 를 구하면

$$\overline{EB} = R \cdot \sin \zeta$$

$$\overline{DC} = \overline{BD} - \overline{BC}$$

$$= \overline{EB} \cdot \tan \zeta - R(1 - \cos \zeta)$$

$$= R \cdot \sin \zeta \cdot \tan \zeta - R(1 - \cos \zeta)$$

$$\overline{DF} = \overline{DC} \cdot \cos \zeta$$

$$\overline{DF} = [R \cdot \sin \zeta \cdot \tan \zeta - R(1 - \cos \zeta)] \cos \zeta$$

$$\therefore \overline{DF} = R(1 - \cos \zeta) \quad (3)$$

공구반경(R)이 5mm이고 공작물의 경사각이 15°와 45°일 때 식(3)에 의해 \overline{DF} 를 구해보면 각각 0.17mm 및 1.46mm가 된다. 따라서 본 실험에서는 미절삭깊이가 0.3mm이므로 경사각이 15°일 때에는 \overline{DF} 가 0.3mm보다 작아 공구정점부가 절삭영역에 포함되며 경사각이 45°일 경우에는 반대로 \overline{DF} 가 0.3mm보다 크므로 공구정점이 절삭영역에 포함되지 않는다. 또 식(3)에서 미절삭깊이가 0.3mm일 때 공구의 정점이 절삭영역에 포함되는 공작물의 최대 경사각은 19.95°임을 알 수 있다. Fig.9와 Fig.10은 Table 1의 절삭조건으로 공작물의 경사각이 각각 15°와 45°일 경우 가

공방향 및 가공경로별 절삭력을 나타낸 것이다.

플엔드밀 절삭부의 정점이 절삭영역에 포함되는 경우인 공작물 경사각이 15°(Fig.9)일 때 하향 및 상향절삭 모두 경사면을 따라 올라가는 상방향절삭시에는 절삭부위의 공구유효직경이 크고, 경사면을 따라 내려가는 하방향절삭시에는 공구유효직경이 작게된다. 따라서 절삭력을 보면 상방향절삭시가 더 작게 나타나고 있는데, 이는 절삭영역이 하방향절삭 보다는 정점에서 멀리 떨어져 있기 때문으로 생각되어진다.

그러나 경사각이 45°(Fig. 10)인 경우보다는 절

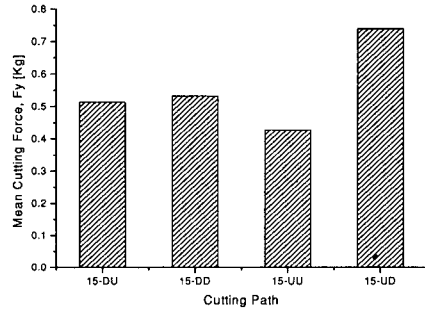


Fig. 9 Comparison of mean cutting force due to cutting method/cutting path ($\zeta = 15^\circ$)

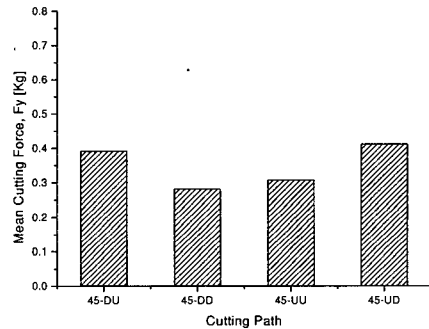


Fig. 10 Comparison of mean cutting force due to cutting method/cutting path ($\zeta = 45^\circ$)

삭영역이 공구 정점부에 가깝기 때문에 가공방향 및 가공경로에 관계없이 절삭력이 크게 나타나고 있다. 공구정점부가 절삭영역에 포함되지 않는 경우인 공작물 경사각이 45°(Fig.10)일 때에는 상향절삭시에는 상방향절삭력이 하방향절삭력보다 작

게 나타나지만, 하향절삭의 경우는 오히려 상방향 절삭력이 하방향절삭력 보다 더 크게 나타나고 있다. 이러한 원인으로는 Fig.11과 같이 상향절삭에서 공구변형을 일으키는 수평절삭력(F_y)의 방향이 공구의 이송방향과 반대방향으로 작용하여 공구의 절삭영역이 상방향가공시에는 공구유효직경이 큰 부위로 이동되고 하방향가공시에는 공구정점방향으로 이동되기 때문에 상방향가공의 절삭력이 작게 나타나는 것으로 생각된다. 그러나 하향절삭시에는 Fig.12와 같이 수평절삭력(F_y)의 방향이 공구 이송방향과 일치하여 공구의 절삭영역이 상방향가공과는 정반대방향으로 이동되어 하방향절삭력이 상방향절삭력 보다 크게 나타나는 것으로 생각된다. 이와 같이 절삭력의 관점에서 고찰하면 공구의 정점부가 절삭영역에 포함되는(경사각 15°) 경우의 가공에서는 상향 및 하향절삭의 상방향으로 가공하는 것이 좋으며 그 중 상향절삭의 상방향으로 가공하는 것이 가장 좋을 것으로 생각된다.

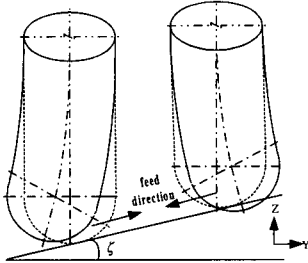


Fig. 11 Tool deflection for up-cutting according to upward/downward cutting path

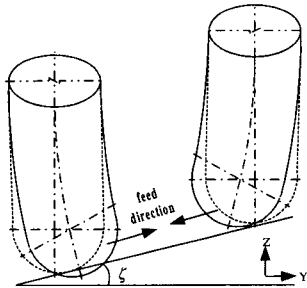


Fig. 12 Tool deflection for down-cutting according to upward/downward cutting path

또 공구의 정점부가 절삭영역에 포함되지 않는 경우(경사각 45°)의 절삭에서는 상향절삭의 상방

향으로, 하향절삭의 하방향으로 가공하는 것이 좋으며 그 중 하향절삭의 하방향으로 가공하는 것이 가장 좋을 것으로 판단된다.

4.2 가공오차 및 표면거칠기

4.2.1 가공오차 특성

하향절삭 및 Table 1의 절삭조건으로 가공하여 측정된 가공오차를 Fig.13에 나타내었다. 가공경로별 특성을 살펴보면 경사각이 15° 에서는 상방향가공이 하방향가공에 비하여 가공오차가 적게 나타났다. 이러한 이유로는 가공시 공구접촉점에서 공구진행방향으로 미변형칩이 형성되므로, 하방향가공에서는 공구의 절삭영역이 공구의 정점부근에 형성되지만, 상방향가공에서는 절삭성이 좋은 공구유효직경이 큰 부분에 형성되어 하방향가공에 비해 수평 절삭력이 작아지기 때문이다.

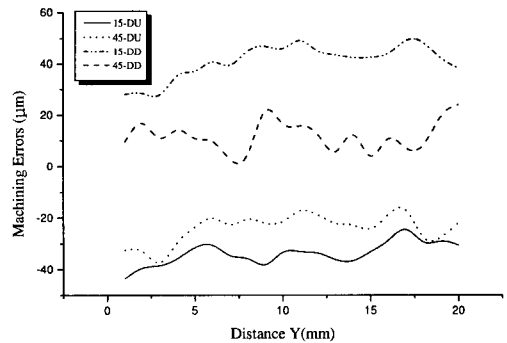


Fig. 13 Comparison of machining errors due to inclined plane / down-cutting

경사각이 45° 에서는 상방향가공이 오히려 하방향보다 더 크게 나타난다. 그 이유로는 절삭력의 특성에서 설명한 것처럼 하방향가공시 수평 절삭력이 이송방향과 같은 방향으로 작용하여 공구의 절삭영역을 변형시키기 때문이다. 또 경사각별로 가공오차를 보면 경사각이 15° 에서 45° 로 증가함에 따라 가공오차는 감소하며 이는 절삭력의 크기와 일치하고 있다. 또한 경사각에 관계없이 가공오차는 상방향일때에는 과절삭이, 하방향일때는 미절삭으로 나타나는데 이러한 결과로는 Fig.12에서와 같이 가공경로에 따라 공구의 변형방향이 달라지기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 하향절삭시 공구의 변형은 공구의 이송방향과 같은 방향으로 일어나기 때문에

가공경로에 따라 과절삭 및 미절삭이 나타나는 것으로 생각된다.

Fig.14는 Table 1의 절삭조건에서 상향절삭시의 가공오차이다. 경사각별 가공오차를 보면 경사각이 작아짐에 따라 가공오차가 증가하고 상방향절삭 보다는 하방향절삭에서 가공오차가 크게 나타나는데, 이는 절삭력의 특성과 일치함을 알 수 있다. 가공경로별로 살펴보면 경사각에 관계없이 상방향절삭에서는 미절삭이 하방향절삭에서는 과절삭이 일어나는데, 이러한 이유로는 Fig.11에서와 같이 공구가 이송방향과 같은 방향으로 변형되기 때문으로 생각된다.

따라서 볼랜드밀 가공은 정삭 가공임을 감안할

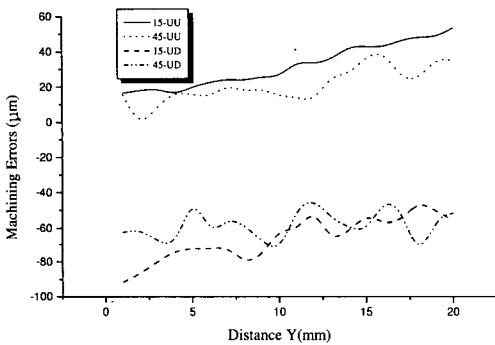


Fig. 14 Comparison of machining errors due to inclined plane / up-cutting

때 미절삭이 발생하고 가공오차가 적은 가공경로를 선정하는 것이 바람직하므로 상향절삭에서는 공작물 경사각 45°, 상방향으로 가공하는 것이 좋으며, 하향절삭에서는 공작물 경사각 45°, 하방향으로 가공하는 것이 바람직하다고 생각된다.

4.2.2 표면거칠기 특성

Fig.15는 Table 1의 절삭조건으로 하향절삭시 표면거칠기를 나타낸 것이다. 공구의 정점부분이 절삭영역에 포함 되는 경우인 공작물 경사각이 15° 일때는 상방향 절삭이 하방향절삭 보다는 더 좋은 표면거칠기를 보이고 있으며 이는 상방향절삭시 절삭영역이 공구유효경이 큰 부위가 되기 때문이라 생각된다. 공구의 정점부분이 절삭영역에

포함이 되지 않는 경우인 공작물 경사각이 45° 인 경우에는 오히려 하방향가공이 상방향가공보다 더 좋은 표면거칠기를 보이고 있으며, 이는 절삭력에서 설명한 것처럼 공구변형이 이송방향으로 발생하여 하방향가공시 절삭영역이 절삭성이 좋은 공구유효경이 큰 부위로 이동되기 때문이라 생각된다. 공작물의 경사각 변화에 따른 표면거칠기를 비교해 보면 경사각이 45° 일때의 표면거칠기가 경사각이 15° 일 때 보다 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 이는 45° 의 경사진 평면에서는 볼랜드밀 정점부분이 절삭에 관여하지 않는 유효직경이 큰 부위에서 절삭이 이루어지나 15° 경사진 평면에서는 절삭성이 좋지 않은 볼랜드밀의 정점부분

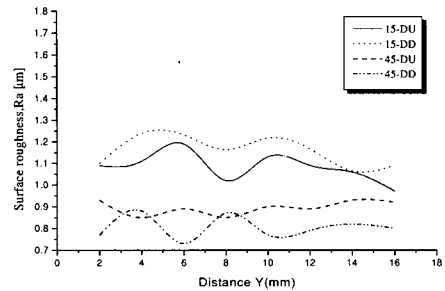


Fig. 15 Comparison of surface roughness due to inclined plane/down-cutting

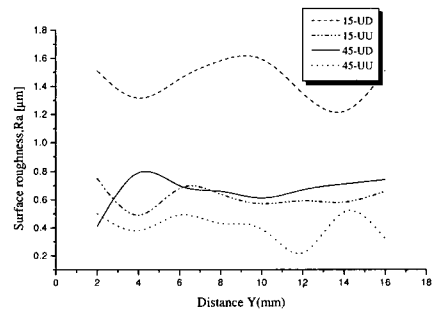


Fig. 16 Comparison of surface roughness due to inclined plane / up-cutting

이 절삭에 관여하기 때문이라 생각된다. 경사각이 작은 경우에는 볼랜드밀의 형상으로 인해 경사각이 큰 경우의 표면거칠기보다 더 불량하고 동일한 경사각에서의 표면거칠기는 절삭력과 비례하고 있는 경향을 보이고 있다.

Fig.16은 Table1의 절삭조건으로 상향절삭시 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 경사각에 관계없이 상방향절삭시 표면거칠기가 하방향절삭에 비해 좋게 나타났으며 경사각별로는 경사각이 45° 일 때의 표면거칠기가 더 양호하게 나타났다. 이러한 원인으로서는 불엔드밀 절삭부의 형상이 반구로 되어 있어 상방향절삭과 경사각이 클수록 절삭성이 양호한 유효직경이 큰 날부에서 가공이 이루어지기 때문이라 생각된다.

5. 결론

가공물의 경사각 및 가공방법, 가공경로에 따른 절삭력 특성과 표면거칠기, 가공오차를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공작물 경사각이 감소할수록 절삭력이 증가함을 알 수 있었다.
2. 공작물 경사각 15° 일 때는 상향절삭의 하방향가공이 45° 일 때는 하향절삭의 하방향가공이 절삭력 측면에서 유리함을 알 수 있었다.
3. 상향절삭에서는 공작물 경사각이 45° 일 때 상방향으로 가공하며 하향절삭에서는 공작물 경사각이 45° 이고 하방향으로 가공하는 것이 가공오차를 줄일 수 있음을 알 수 있었다.
4. 표면거칠기는 공작물 경사각이 작을수록 불량하며 동일한 경사각에서는 절삭력과 비례하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. H.Y. Feng and C.H. Menq, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process. Part1: Model Formulation and Model Building Procedure," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No. 5, pp. 697~710, 1994.
2. H. Y. Feng and C. H. Menq, " The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process. Part2 : Cut Geometry Analysis and Model Verification," International Journal of

Machine Tools and Manufacture, Vol. 34, No. 5, pp. 711~720, 1994.

3. J. W. Sutherland, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 269~212, 1986.
4. H. Y. Feng and C. H. Menq, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 18, pp. 461~469, 1996.
5. H. Y. Feng and C. H. Menq, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," Trans. of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, No. 4, pp. 461~469, 1996.
6. C. C. Tal, K. H. Fhu, "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling," International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 35, No. 1, pp. 45~54, 1991.
7. W. A. Kline and R. E. Devor, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," International Journal of Machine Tool Design Research, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22, 1982.
8. 서남섭, "절삭가공학," 동명사, pp. 103, 1999.