

공구경로 변화에 따른 고속 볼 엔드밀 가공에서 경사면의 특성(I)

김 경 균*, 강 명 창**, 이 득 우**, 김 정 석**, 이 용 철***

Characteristics of Inclined Plane Constructed by High speed Ball End Milling according to the Variation of Cutting Direction(I)

K. K Kim*, M. C Kang**, D. W Lee**, J. S Kim**, Y. C Lee***

Abstract

The study of the high speed machining of inclined plane using ball end mill is performed. The use of ball end mill is rapidly growing in die and mold manufacturing. The cutting characteristics, such as cutting force, surface roughness and surface profile, are varied according to the variation of cutting directions. Free surface is cut using ball end mill, the surface profile is greatly varied depending upon the cutting direction.

So this study will deal with the characteristics of cutting such as cutting efficiency according to the inclined plane of the workpiece, the cutting force according to tool path, surface profile and the roughness of surface. The optimal cutting direction to be applied the cutting for 3-D sculptured surfaces can be show through the results of this study.

Keywords : Ball-End Mill(볼엔드밀), Inclined Plane(경사면), Cutting direction(공구경로), Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면 거칠기), Surface Profile(표면형상), 3-D Sculptured Surfaces(3차원 형상가공)

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부, ERC/NSCM

*** 연암공업대학 정밀기계학과

1. 서론

최근 기계산업의 발달에 따라 항공기, 자동차, 금형 산업 등에 있어서 미적인 디자인과 복잡한 기능을 요구함으로써 그에 따른 해결방안으로 고정도·고능률 곡면형상 가공이 대두되어지고 있다. 이러한 곡면형상은 대부분이 CNC 머시닝센터에서 볼 엔드밀링 절삭에 의해 생성되는데, 이는 금형재의 자유곡면 절삭가공에 많이 사용되고 있는 공정으로 그 사용이 더욱 확대되고 있다.

한편 볼 엔드밀 공구의 특징은 공구 선단부분이 반구형으로서 강성이 떨어지고 공구 정점부위에서는 가공이 일어나지 않는다. 또한 공작물의 가공면에 커스프(Cusp)가 발생하여서 마무리 다듬질을 필요로 한다. 금형재 가공에서는 마무리 다듬질 공정이 전체 가공시간의 약 30~50%나 차지하므로 마무리 다듬질공정 시간을 줄이는 게 곧 금형 산업에서 경쟁력을 향상시키는 길이다. 경사면인 금형재를 절삭할 때는 경사면의 기울기에 따라서 볼 엔드밀에 작용하는 절삭부위가 달라 절삭특성의 변화가 심하게 일어난다. 그리고 같은 경사면에서도 공구경로에 따라서 공구에 작용하는 절삭부위의 변화로 가공면에 커스프가 다르게 생성되어 표면형상도 서로 다르다. 표면형상은 마무리 다듬질 공정을 결정하는 주요한 인자중의 하나로서 절삭상태를 미리 예측하여 균일한 표면형상을 얻기 위한 노력이 필요하다.

Hosoi, T⁽¹⁾, Kishiname⁽²⁾ 와 Aoyama⁽³⁾ 등은 볼 엔드밀 형상을 개선하는 연구를 수행하였으며, Tai⁽⁴⁾, Feng⁽⁵⁾, 홍민성⁽⁶⁾과 양민양⁽⁷⁾ 등은 볼 엔드밀 절삭가공에서 절삭력 및 표면형상을 예측하는 방법을 제시하였다. 이러한 연구들은 대부분 저속영역에서 행하였으며, 고속가공으로 경사면에 대하여 공구와 공작물간의 절삭력 변동을 유발하는 곳에서는 아직 보고되고 있지 않다.

이에 본 연구에서는 경사면을 가지는 금형소재(HP-4M)에서 고능률, 고정밀 가공을 위해 경사면의 기울기와 공구경로에 따른 절삭력과 표면형상 및 표면 거칠기 등 절삭특성을 파악하고, 공구수명 향상 및 균일한 표면형상을 얻을 수 있는 수평·상방향으로 세분력 절삭력과 표면 거칠기 파형을 비교하여 2차원 및 3차원 자유곡면가공에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

공작기계의 성능 향상과 더불어 최근에는 가공기술의

한 예로 공구수명을 높이기 위해 절삭력이 작게 걸리는 하향절삭(Down Cutting)이 많이 이용되고 있다. 그러나 공작물이 경사진 면에 있어서는 동일한 하향절삭에서도 공구경로의 변화, 즉 절삭방향에 따라 가공 특성에 큰 차이를 보이고 있다.

Fig. 1은 공작물의 경사면에서 하향절삭이면서 공구 경로를 달리 할 수 있는 다음의 4가지의 방법을 보여주고 있다.

- 1) 하향 및 수평·하방향(Horizontal Downward : H.D) 절삭
- 2) 하향 및 수평·상방향(Horizontal Upward : H.U) 절삭
- 3) 하향 및 수직·하방향(Vertical Downward : V.D) 절삭
- 4) 하향 및 수직·상방향(Vertical Upward : V.U) 절삭

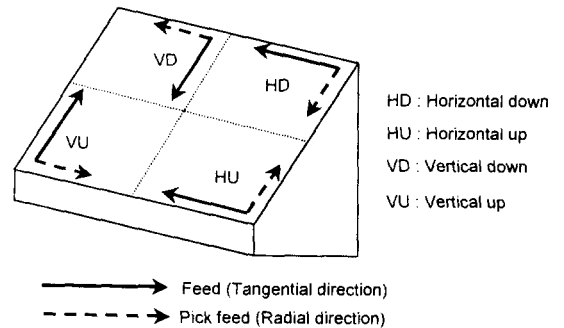


Fig. 1 Cutting direction according to tool path on inclined plane

이 각각의 조건들은 같은 하향절삭이지만 절삭 칩의 흐름이 공구 경로에 따라 다른 특성을 가지게 되며 이에 따라 절삭특성의 차이를 보인다. 볼 엔드밀링에서 절삭력과 표면 거칠기 및 공구수명 등에 주요한 영향을 미치는 요인중의 하나인 절삭속도는 주축회전수와 공구직경의 크기에 따라 얻을 수 있다. 또한 자유곡면 가공에서와 같이 볼 엔드밀의 접촉점이 변화하면 절삭속도도 변화하며, 절삭방향에 따라 절삭력 및 공구변형 등에 영향을 미친다.

다양한 경사면에서 공구경로에 따른 절삭부위를 Fig. 2에 나타내었다. 경사면이 15°, 30°, 45°로 증가할수록 공구 외각부위에서 절삭이 일어나므로 공작물에 작용하는 절삭시작점에서의 실제 유효 공구직경은 약

2.58mm, 5mm, 7mm이다. 따라서 동일한 주축회전수에 서도 실제 유효 공구 직경에 따른 절삭속도를 식 (1)을 통하여 구하면 절삭속도가 65m/min, 125.6m/min, 175.9m/min로 증가한다.

$$V = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (1)$$

여기서 V : 절삭속도(m/min), D : 실제 유효 공구 직경(mm), N : 주축 회전수(rpm)

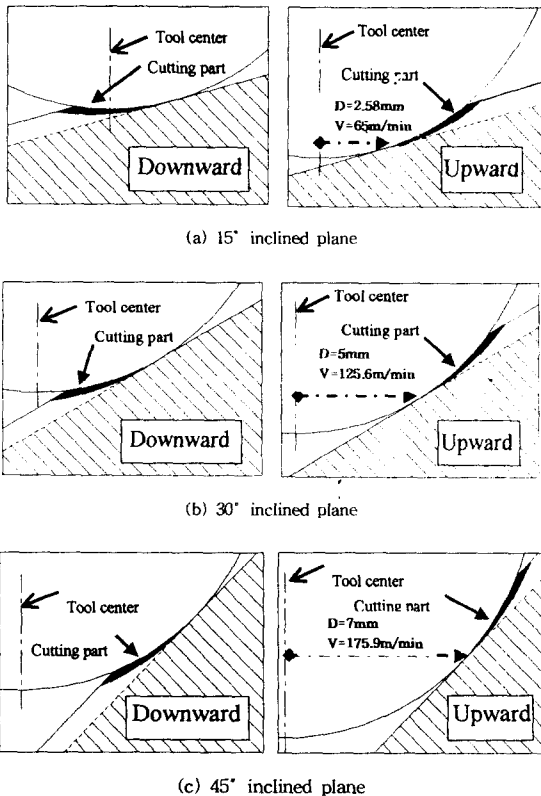


Fig. 2 Comparison of cutting part and cutting speed in ball-end mill tool according to tool path(d=0.4mm)

그러나 (a)의 15° 경사면은 유효 공구직경이 2.58mm 되는 부분에서 절삭이 일어나지만 절삭방향이 하방향으로 진행할 때는 볼 엔드밀의 중심부위에서 절삭이 이루어지며, 상방향일 때는 외곽부위에서 절삭이 이루어짐을 알 수가 있

다. 따라서 같은 경사면에서도 절삭방향이 하방향과 상방향 이 됨에 따라 절삭부위가 다르게 나타난다. 그러므로 절삭 선속도도 하방향일 때보다는 상방향일 때가 더 크다.

각각의 실험조건은 Table 1에 나타난 바와 같이 다듬 질 연마 시간을 줄이기 위해서 정사각형의 균일한 표면형 상을 얻고자 공구 이송방향 및 피크피드 방향의 속도를 같게 하여(fp가공법) 가공하였다. 주축 회전수는 8,000 rpm으로 일정하게 하여 각각의 경사면에 따른 절삭특성 을 살펴보았다. 표면 거칠기 측정을 위하여 측정식 표면 거칠기를 사용하여 세로축을 2,000배와 5,000배 가로축 을 100배와 200배로 하였다. 공작기계는 수직형 CNC 고속 머시닝센터를 사용하였으며, 절삭력은 압전형 공구동 력계를 이용하여 세분력 방향의 절삭력을 측정하였다.

Table 1 Experimental conditions

Workpiece (inclined plane)	HP-4M (HRc28)	
	15°, 30°, 45°	
Spindle revolution S	8,000rpm	
Feed rate F	3,200mm/min	
Feed per tooth fz	0.2mm/tooth	
Depth of cut d	0.2mm	0.4mm
	Pick feed pr	
Tool	0.4mm	0.4mm
	∅ 10-2teeth AlTiN (Tool overhang 50mm)	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공구경로에 따른 절삭력 특성

15°, 30°, 45° 기울어진 공작물의 경사면에서 공구 경로에 따른 세분력 방향의 절삭력을 Fig. 3에 나타내었다. 공작물의 경사면이 증가할수록 세분력 방향의 절삭력은 대체적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 공구에 작용하는 실제 유효 공구직경의 차이로 절삭속도가 증가하기 때문이다. 또한 수평·하방향(H.D)에서 공구 이송방향 절삭력은 경사면이 15° 일 때는 절삭 선속도가 0이 되는 공구 중심부위에서 상향절삭과 하향절삭이 동시에 작용하므로 절삭력이 220N이상으로 크게 발생하지만, 45° 일 때 절삭력은 54N으로 줄어든다. 공구 축방향의 절삭력은 15° 와 30° 일 때 178N, 152N으로 45° 일 때의 30N 보다 약 5~6배 정도 더 크게 나타난다. 이러한 공구 축 방향 절삭력의 증가는 공구마멸에 상당한 영향으로 작용하므로 절입깊이 0.4mm에서 수평·하방향절삭은 30° 이

하의 경사면에서는 적절한 공구경로가 아님을 알 수가 있다. 한편 15° 경사면에서 같은 하향절삭이지만 하방향과 상방향에 따른 절삭력 차이는 절삭 선속도의 변화와 더불어 크게 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 이는 공구수명 및 절삭온도 등의 가공 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 그러므로 절삭력의 측면에서는 절삭방향이 하방향일 때보다 상방향 일 때가 더 유리하다.

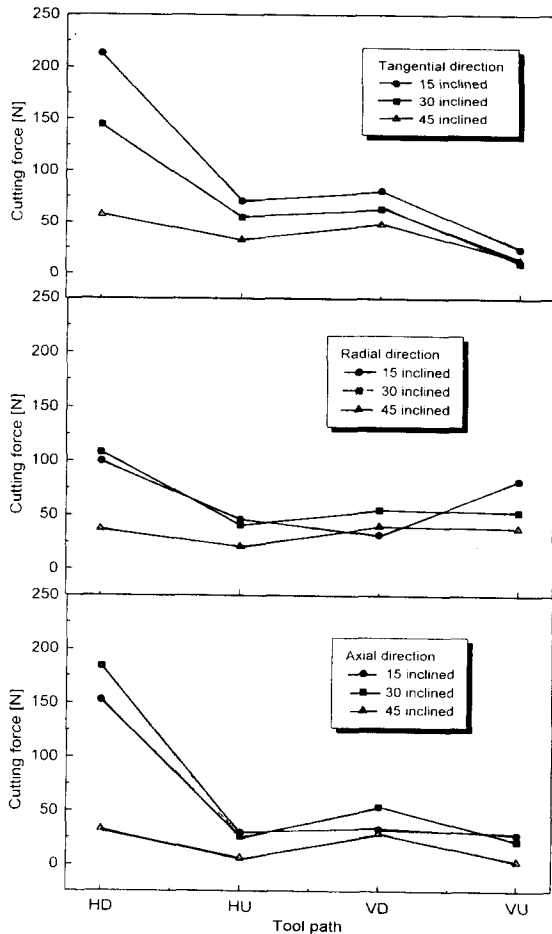


Fig. 3 Cutting force according to increase of inclined plane with tool path($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$ $s=8000\text{rpm}$)

또한 같은 기울기를 가지는 경사면에서 절삭방향이 하

방향일 때보다 절삭 선속도가 큰 수평·상방향과 수직·상방향에서도 공구 이송방향이 오른쪽에서 왼쪽으로 수평인 수평·상방향은 공구 축의 상·하 이동이 없는 반면, 수직·상방향은 공구 축의 상·하 이동에 따라서 공구 축의 상·하 흔들림이 발생한다. 이러한 공구 축의 흔들림은 단속절삭인 볼 엔드밀링 절삭가공에서 충격력에 의한 공구의 칩핑과 플랭크 마멸을 촉진시키는 원인이 되어 공구수명이 단축될 것이다.

3.2 공구경로에 따른 표면 형상의 특성

동일한 단면적에서 가공 커스프가 가장 적게 발생하는 정사각형의 균일한 형상을 얻고자 fp가공법으로 절삭을 하여도 공구경로와 공작물의 경사진 각의 변화에 따라 다양한 표면형상을 나타낸다.

15° 경사면의 공작물을 가공 후 공구경로에 따른 표면형상을 Fig. 4에 나타내었다. 15° 경사면에서는 수평·상방향일 때 정사각형의 균일한 형상이 나타나지만 다른 공구경로에서는 벌집형태의 육각형을 나타낸다. 공구 선단부 위에서 하향절삭과 상향절삭이 동시에 발생하는 수평·하방향에서는 과도한 절삭력이 발생하므로 표면이 뜯겨나간 흔적이 남아있다. 그리고 수직·하방향 및 수직·상방향에서는 수평·상방향일 때보다 절삭과정 중에 공구 축의 상·하 흔들림으로 인해 공구수명이 짧으며, 표면형상에서는 모서리 부분이 많아서 다듬질 연마공정에서의 연마시간이 많이 소요될 것으로 예상된다.

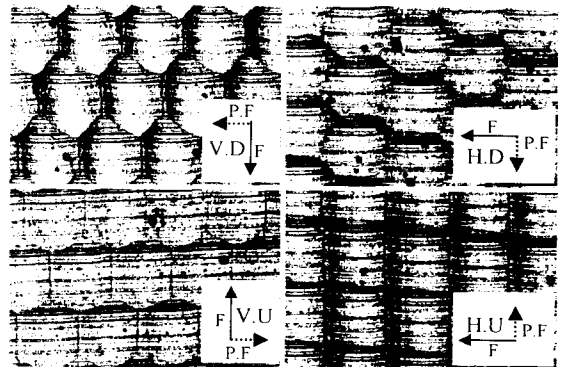


Fig. 4 Surface profile according to tool path on 15° inclined plane($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

Fig. 5의 30° 경사면에서 수직·하방향 및 수직·상방

향은 15° 경사면의 벌집형태인 육각형 형상에서 45° 경사면의 사각형 형상으로 되는 중간 단계로서 실제 유효 공구 직경은 5mm로 동일하다. 하지만 수직·하방향일 때는 공구 한회전당, 절삭폭이 서로 다른 2개의 절삭흔이 생성된 후 45° 경사면에서 사각형 형태로 된다. 그리고 수직·하방향보다 절삭 선속도가 큰 수직·상방향일 때는 사각형 형상의 바로 전단계로 형태가 복잡하게 나타나지만 45° 경사면에서는 수직·하방향보다 균일한 사각형이 된다.

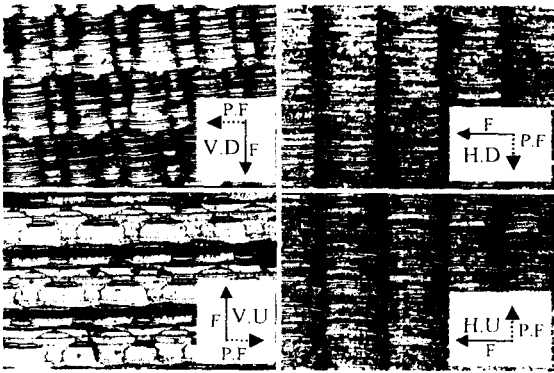


Fig. 5 Surface profile according to tool path on 30° inclined plane ($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

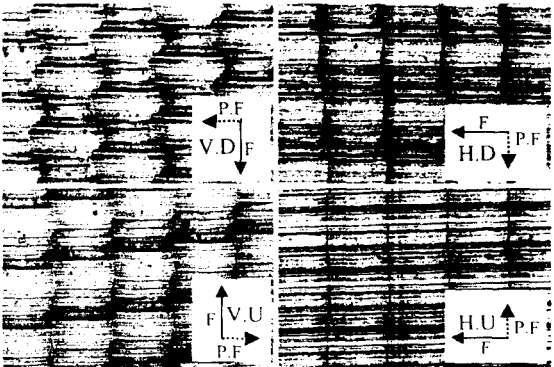


Fig. 6 Surface profile according to tool path on 45° inclined plane ($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

Fig. 6의 45° 경사면에서는 4가지의 공구경로 모두 정사각형의 형태를 나타내고 있으므로 f_p 가공법에 의한 효과가 가장 잘 나타난다. 그러므로 주어진 본 실험조건에서는 공구와 공작물이 45°가 되게 유지하여 실제 유효 공구 직경을 보다 크게 한다면 공구경로의 영향을 적게 받음

을 알 수 있다.

3.2 공구경로에 따른 표면거칠기 특성

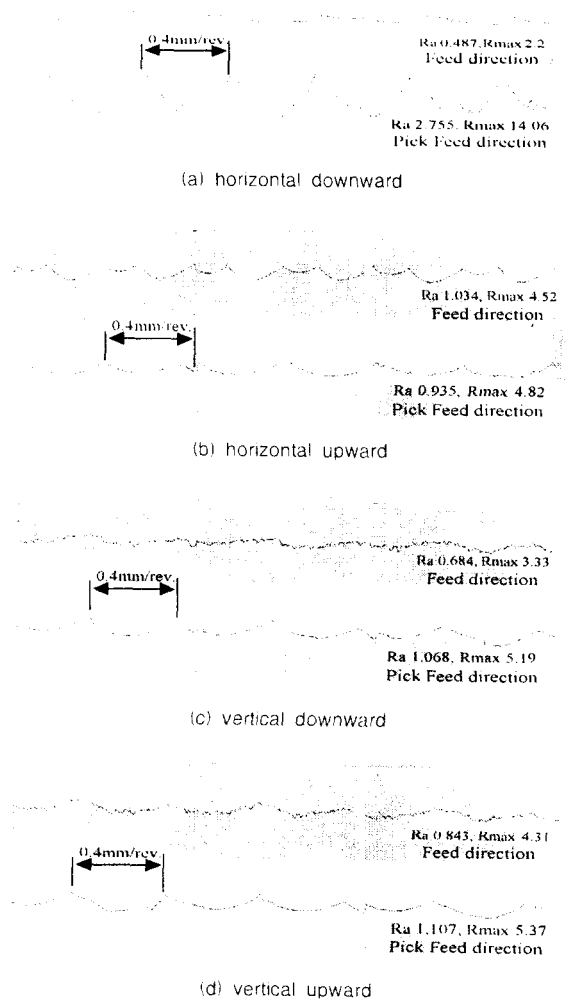


Fig. 7 Surface waviness according to tool path on 15° inclined plane ($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

공구경로에 따른 공구 이송방향 및 피크피드방향의 표면 거칠기 파형을 15° 경사면에 대해서 Fig. 7에 나타내었다. 공구 중심부위에서 하향절삭과 상향절삭이 발생하는 (a)수평·하방향에서는 Fig. 4에서 보는바와 같이 절삭 선속도가 0이 되는 부위로서 절삭이 제대로 일어나지 않아

공구 이송방향 최대 표면 거칠기 R_{max} 2.2 μ m로 커스프가 평면처럼 완만하게 나타난다. 그리고 피크피드 방향에서는 최대 표면 거칠기 R_{max} 14 μ m로 과도한 절삭에 의한 커스프임을 알 수 있다. (b)수평·상방향은 공구 이송방향에서 공구 한회전당 2개의 절삭흔이 나타나며, 피크피드방향에서도 균일한 가공 커스프가 발생하는 것으로 보아 안정된 공구경로이다. 공구 이송방향이 수직인 (c)수직·하방향 및 (d)수직·상방향 절삭에서는 공구 이송에서 공구 축의 상·하 흔들림이 그대로 표면 거칠기에 나타난다. 그러므로 자유곡면 절삭가공에서 공구 축의 상·하 흔들림이 없는 수평·하방향 및 수평·상방향으로 하는 것이 좋으나 수평·하방향은 15° 경사면에서 불안정한 절삭상태를 나타내므로 수평·상방향절삭이 보다 효과적이다.

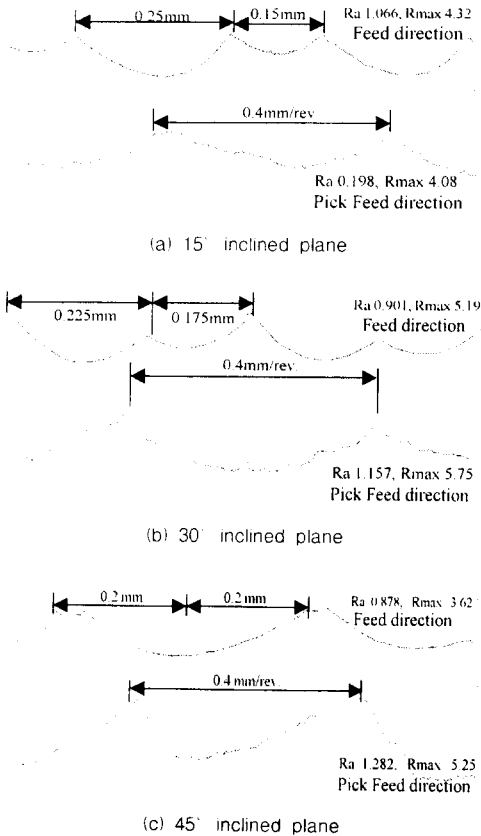


Fig. 8 Surface waviness according to increase of inclined plane on horizontal upward ($d=04$.mm, $p_f=0.4$ mm, $f_z=0.2$ mm, $S=8000$ rpm)

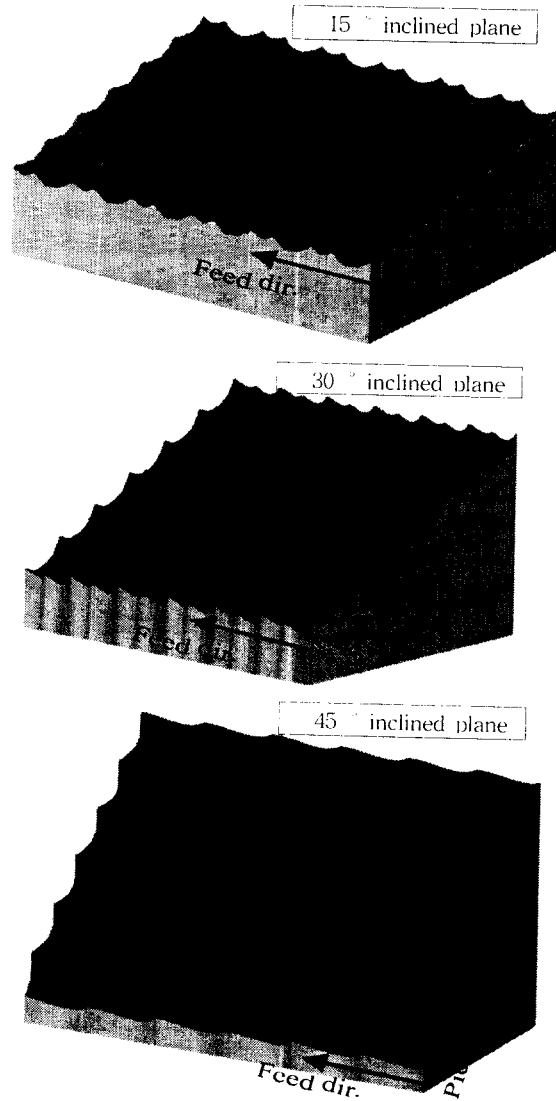


Fig. 9 Surface profile according to increase of inclined plane in horizontal upward ($d=04$.mm, $p_f=0.4$ mm, $f_z=0.2$ mm, $S=8000$ rpm)

경사면 절삭에서 4가지 공구경로 중 가장 효율적인 수평·상방향절삭으로 공작물 경사면을 증가시켰을 때의 표면 거칠기 파형을 Fig. 8에 나타내었다. (a)의 15°에서는 첫째 공구날은 0.25mm, 두 번째 공구날은 0.15mm

향은 15° 경사면의 벌집형태인 육각형 형상에서 45° 경사면의 사각형 형상으로 되는 중간 단계로서 실제 유효 공구 직경은 5mm로 동일하다. 하지만 수직·하방향일 때는 공구 한회전당, 절삭폭이 서로 다른 2개의 절삭흔이 생성된 후 45° 경사면에서 사각형 형태로 된다. 그리고 수직·하방향보다 절삭 선속도가 큰 수직·상방향일 때는 사각형 형상의 바로 전단계로 형태가 복잡하게 나타나지만 45° 경사면에서는 수직·하방향보다 균일한 사각형이 된다.

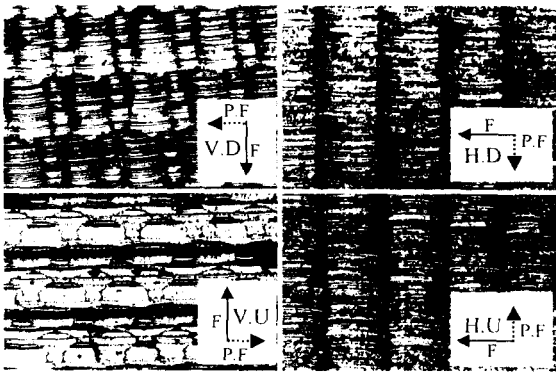


Fig. 5 Surface profile according to tool path on 30° inclined plane ($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

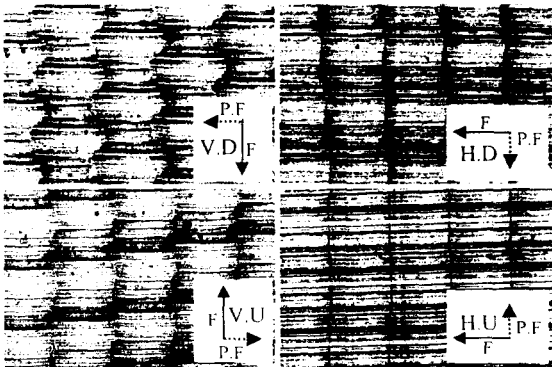


Fig. 6 Surface profile according to tool path on 45° inclined plane ($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

Fig. 6의 45° 경사면에서는 4가지의 공구경로 모두 정사각형의 형태를 나타내고 있으므로 f_p 가공법에 의한 효과가 가장 잘 나타난다. 그러므로 주어진 본 실험조건에서는 공구와 공작물이 45°가 되게 유지하여 실제 유효 공구 직경을 보다 크게 한다면 공구경로의 영향을 적게 받음

을 알 수 있다.

3.2 공구경로에 따른 표면거칠기 특성

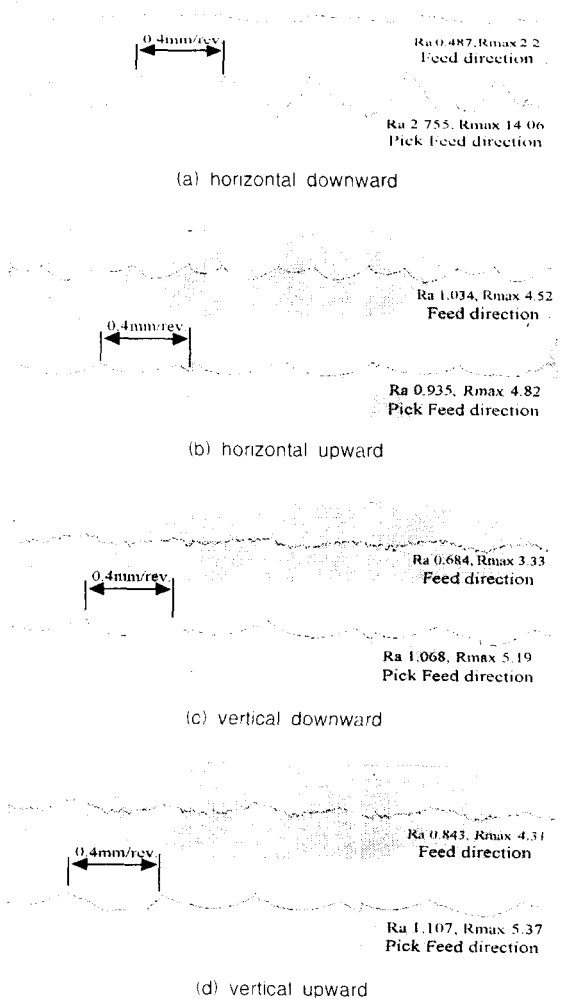


Fig. 7 Surface waviness according to tool path on 15° inclined plane ($d=0.4\text{mm}$, $p_f=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

공구경로에 따른 공구 이송방향 및 피크피드방향의 표면 거칠기 파형을 15° 경사면에 대해서 Fig. 7에 나타내었다. 공구 중심부위에서 하향절삭과 상향절삭이 발생하는 (a)수평·하방향에서는 Fig. 4에서 보는바와 같이 절삭 선속도가 0이 되는 부위로서 절삭이 제대로 일어나지 않아

공구 이송방향 최대 표면 거칠기 R_{max} $2.2\mu\text{m}$ 로 커스프가 평면처럼 완만하게 나타난다. 그리고 피크피드 방향에서는 최대 표면 거칠기 R_{max} $14\mu\text{m}$ 로 과도한 절삭에 의한 커스프임을 알 수 있다. (b)수평·상방향은 공구 이송방향에서 공구 한회전당 2개의 절삭흔이 나타나며, 피크피드방향에서도 균일한 가공 커스프가 발생하는 것으로 보아 안정된 공구경로이다. 공구 이송방향이 수직인 (c)수직·하방향 및 (d)수직·상방향 절삭에서는 공구 이송에서 공구 축의 상·하 흔들림이 그대로 표면 거칠기에 나타난다. 그러므로 자유곡면 절삭가공에서 공구 축의 상·하 흔들림이 없는 수평·하방향 및 수평·상방향으로 하는 것이 좋으나 수평·하방향은 15° 경사면에서 불안정한 절삭상태를 나타내므로 수평·상방향절삭이 보다 효과적이다.

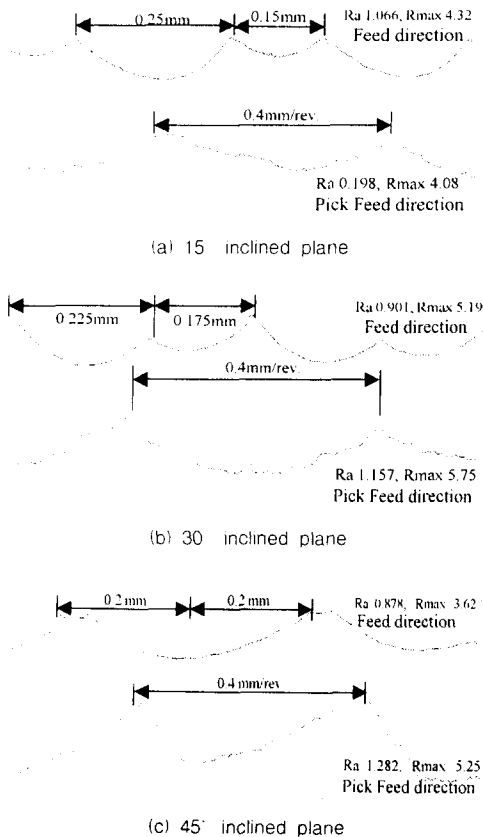


Fig. 8 Surface waviness according to increase of inclined plane on horizontal upward ($d=04.\text{mm}$, $p_r=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

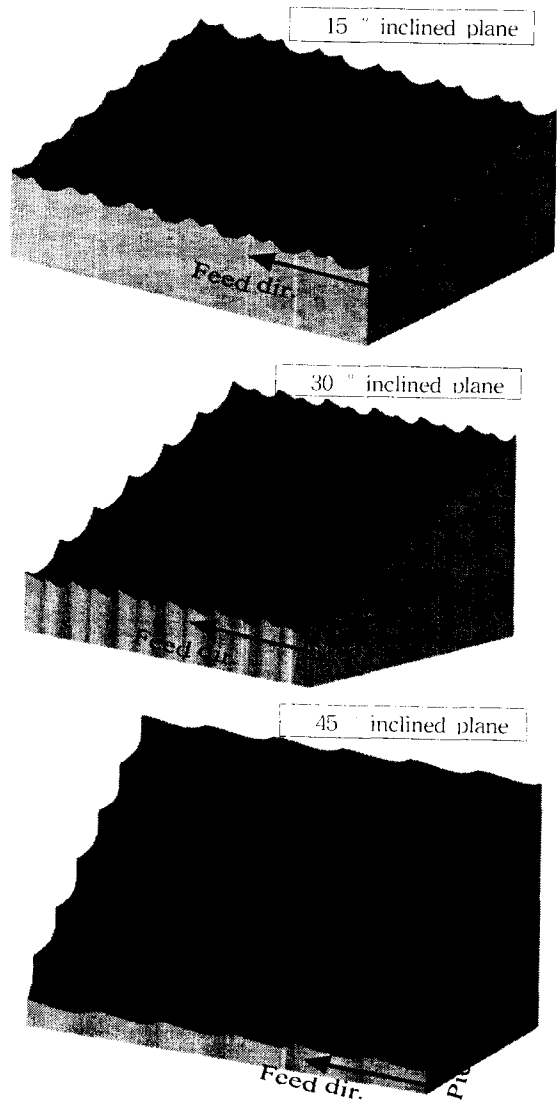


Fig. 9 Surface profile according to increase of inclined plane in horizontal upward ($d=04.\text{mm}$, $p_r=0.4\text{mm}$, $f_z=0.2\text{mm}$, $S=8000\text{rpm}$)

경사면 절삭에서 4가지 공구경로 중 가장 효율적인 수평·상방향절삭으로 공작물 경사면을 증가시켰을 때의 표면 거칠기 파형을 Fig. 8에 나타내었다. (a)의 15° 에서는 첫째 공구날은 0.25mm , 두 번째 공구날은 0.15mm

의 절삭폭을 가지며, (b)의 30° 에서도 각각 0.225mm, 0.175mm로 비대칭 절삭폭을 가진다. 그러나 (c)의 45° 에서는 2개의 공구날 모두 대칭적으로 0.2mm의 균일한 절삭폭을 가진다. 따라서 본 실험조건에서는 공작물의 경사면이 증가할수록 비대칭 절삭폭은 점차 감소하여, 45° 경사면에서는 2날 공구의 대칭절삭에 의해 공작물 표면에 가공 커스프가 적게 남는다.

Fig. 9는 본 실험조건으로 절삭하였을 때 공구 이송방향 및 피크피드 방향의 표면 거칠기 파형을 중첩시켜서 3차원 절삭표면을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 살펴본 바와 같이 15° 및 30° 경사면에서는 이송방향으로 공구 한 회 전당 비대칭 절삭폭을 나타내고 있으나, 45° 경사면에서는 정사각형의 균일한 형태가 나타나므로 fp가공법에 의한 효과가 가장 좋음을 알 수 있다.

4. 결론

볼 엔드밀을 이용한 고속가공에서 주어진 본 실험의 절삭조건에 대하여 다양한 경사면을 가지는 금형강(HP-4M)의 공구경로에 관한 특성 조사를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 볼 엔드밀 공구는 기하학적 특성으로부터, 공작물의 경사진 각의 증가에 대하여 절삭속도의 증가에 따라 세분력 방향의 절삭력은 감소하며, 하방향에 비하여 상방일 때가 절삭력의 크기가 작은 경향을 보인다.
- 2) 경사면의 4가지 공구경로 중 수평·상방향절삭이 공구 이송시 공구 축의 상·하 흔들림이 발생하지 않으며, 15° 경사면에서도 공구중심 부위에서 절삭되지 않는 수평·상방향 절삭이 표면형상 및 공구수명 측면에서 우수하다.
- 3) 수평·상방향절삭에서 공작물의 경사면이 증가할수록 비대칭 절삭폭은 점차 작아지며, 45° 경사면에서는 2 날 공구의 대칭절삭에 의해 가공면에 커스프가 적게 남아 fp 가공법에 의한 다듬질 연마시간의 단축효과를 가진다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- 1) Hosoi, T., Hoshi, "Cutting Actions of Ball-End Mill with a Sprial Edge", Annals of CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 49~59, 1997
- 2) Kishiname, T.et al, "On Relationship between Cutting Ability and Cutting Edge Shape of Circular Cutting Edge Ball End Mill", J. of JSPE, Vol. 48, No. 7, pp. 68~74, 1982
- 3) Aoyama, H, et al, "Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill", J. of JSPE, Vol. 53, No. 3, pp. 461~466, 1987
- 4) C.C. Tal, K. H. Fhu, "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling", Int. J. Mach. Tools & Manufact, Vol. 35, No. 4, pp. 51~54, 1995
- 5) H. Y. Feng, C. H. Menq, "The Prediction of Cutting Forces in The Ball-End Milling", Int. J. Mach. Tools & Manufact, Vol. 34, No. 5, pp. 697~710, 1994
- 6) 홍민성, 윤병운 "밀링작업에서 보조장치를 이용한 자유곡면의 표면거칠기 향상에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제5권 제3호, pp. 66~72, 1996
- 7) M. Y. Yang, H. D. Park, "The Prediction of Cutting Forces in Ball-End Milling", Int. J. Mach. Tools & Manufact, Vol. 31, No. 1, pp. 45~54, 1991