

볼 엔드밀의 경사면 가공에서 공구경로와 절삭속도에 따른 공구수명의 특성
(Characteristics of Tool Life according to the Cutting Direction and Cutting Speed in
Machining on Inclined Plane using Ball End Mill)

박윤중*, 김경균(부산대 원), 강명창(부산대 기계공학부), 김정석, 이득우(부산대 ERC/NSDM)
Yung Jong Park, Kyung kyoon Kim(Grauduated School, Pusan Nat'l Univ.)
Myeong-chang Kang, Jeong-suk Kim, Deuk-woo Lee(Pusan Nat'l Univ.)

Abstract

This paper deals with the establishment of the cutting direction on inclined plane by using ball end mill. Ball-end milling is widely used for free form surface die and mold. In these machining, the cutting parts vary because the tool tip is hemisphere shaped. The cutting characteristics, such as cutting force, surface roughness and surface profile are varied according to the variation of cutting directions. The effective tool diameter was calculated on different tilt angles and tool-path. Tool life and cutting characteristics were estimated on variation of cutting directions in the same cutting speed. In this paper, the optimal cutting direction which can be applied 3-D sculpture surface cutting is suggested.

Key Words : Inclined palne(경사면), Hemisphere shaped(반구형), Surface roughness(표면 거칠기), Surface profile(표면 형상),

1. 서 론

최근 기계·전자산업이 발달함에 따라 볼 엔드밀을 이용한 자유곡면 가공이 많이 이용되고 있으며, 이를 이용한 공정은 더욱 확대되고 있다. 금형의 마무리 가공에서 공구수명은 특히 중요한 인자이다. 왜냐하면 공구마멸이 진행됨에 따라 형상정밀도와 표면조도가 나빠질 뿐만 아니라 가공 중 공구교환이 이루어지면 가공 표면에 공구교

환 흔적을 남기기 때문이다.

볼 엔드밀링 작업과정은 절삭력이 주기적으로 변동하는 성질, 즉 다절인(Multi-point tool)공구가 회전함에 따라 단속절삭이 이루어지고, 절삭 중 절삭칩의 두께 변화나 한 개 이상의 날이 동시에 절삭에 참여하는 등 볼 엔드밀의 복잡한 절삭기구로 인하여 절삭조건 선정은 작업자의 경험으로 부여되는 것이 대부분이다. 특히 공구 선단(Tool tip)부분이 반구형으로 공구의 강성이 떨어지고 정점부위에서는 절삭속도가 '0'이 되어 가공이 일어나지 않는다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Kishiname^{[1][2]} 와 Aoyama^[3] 등은 볼 엔드밀 형상을 개선하고자 하는 노력과 볼 엔드밀링의 절삭기구 해석을 이용하여 적절한 절삭조건을 부여하고자 하는 노력이 병행되어 왔다. 하지만 자유곡면을 가진 금형재를 가공할 때는 공작물의 경사각 각도 및 공구경로에 따라 볼 엔드밀에 작용하는 절삭력과 유효직경의 변화가 심하게 나타난다^{[4][5]}. 그러므로 경사면을 가공할 때 적절한 공구경로 선정이 고정밀·고효율 가공을 위해서 필요하다^[6].

이에 본 논문에서는 공작물의 경사각과 공구경로에 따라 유효공구직경을 구하고, 동일한 절삭속도에서 공구경로 변화에 따른 공구수명과, 가공특성을 비교 분석한 후 최적의 공구경로를 선정하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

공작기계의 성능 향상과 더불어 최근에는 가공기술의 한 예로 공구수명을 높이기 위해 절삭

력이 작게 걸리는 하향절삭(Down cutting)이 많이 이용되고 있다. 그러나 공작물이 경사진 면의 가공에서는 동일한 하향절삭에서도 공구경로의 변화, 즉 절삭방향에 따라 가공 특성에 큰 차이를 보이고 있다.

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

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

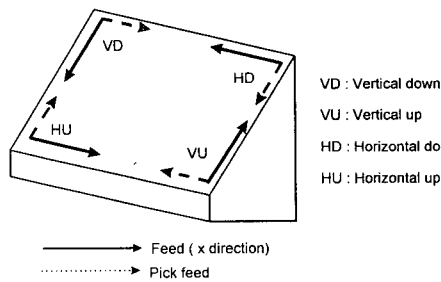


Fig. 1 Cutting direction according to tool path on inclined plane

이 각각의 조건들은 같은 하향절삭이지만 절삭 칩의 흐름이 공구 경로에 따라 다른 특성을 가지게 되며, 자유곡면 가공에서와 같이 볼 엔드밀의 접촉점이 수시로 변화하는 곳에서는 실제 유효직경이 달라지게 되어 절삭특성의 차이를 보인다. 볼 엔드밀링에서 절삭력과 표면 거칠기 및 공구수명 등에 큰 영향을 미치는 요인중의 하나인 절삭속도는 주축회전수와 유효공구직경으로 얻을 수 있다. 유효직경은 최대유효직경과 최소유효직경을 평균하였으며, 본 실험에서는 모든 경로에서 절삭속도가 동일하도록 가공을 행하였다.

Fig. 2에서는 경사각과 공구경로 변화에 따른 절삭부위를 나타내었으며, 경사면이 15°에서 45°로 증가할수록 공구 외각부위에서 절삭이 일어난다.

본 실험에서는 금형 산업현장에서 많이 쓰이고 있는 열처리 고경도재(STD11, HRc50)를 사진 1에서 나타낸 바와 같이 15°, 45° 경사지게 하

여 표 1과 표 2에 실험조건으로 절삭속도를 동일하게 한 뒤 공구경로에 따른 칩 모양 및 공구 수명을 절삭깊이(d) 0.4mm, 피크피드(pf) 0.4mm, 공구 한 회전당이송(f_z) 0.4mm로 하여 비교 평가 하려고 한다.

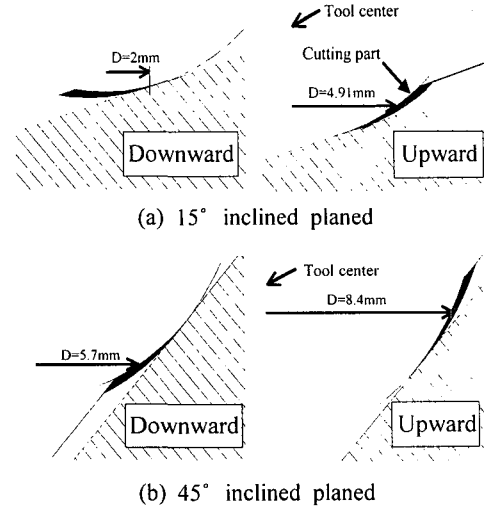


Fig. 2 Comparison of cutting part in ball-end mill tool according to tool path (d=0.4mm)

Table 1 Experimental conditions

	effective diameters (mm)	cutting speed (m/min)	spindle speed (rpm)	feed rate (mm/min)
15° H.U	4.91	100	6486	2594
15° H.D	2		15923	6369
45° H.U	8.4		3791	1516
45° H.D	5.7		5587	2234

Table 2 Experimental conditions

	effective diameters (mm)	cutting speed (m/min)	spindle speed (rpm)	feed rate (mm/min)
45° H.U	8.4	300	11374	4550
45° H.D	5.7		16762	6705
45° V.U	8.4		11374	4550
45° V.D	5.7		16762	6705

최고 주축 회전수 20,000rpm 까지 가능한 수직형 고속 CNC 머시닝센터와 공구로는 OSC ψ

10 2날 블엔드밀을 사용하였다. 플랭크 마멸 측정을 위해 공구현미경(OLYMPUS사 SZ40)을 사용하였다.



Photo 1 Experimental setup for tool wear

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공구경로에 따른 칩 형상

공구의 진행에 따라 칩이 공작물의 본체로부터 분리되는 상황을 관찰하면 공구 날의 형상, 공작물의 재질, 절삭속도, 칩의 크기 및 절삭 유제 등에 따라 서로 다르다. 하지만 절삭 중에 생성되는 칩은 절삭상태를 파악할 수 있는 주요한 인자중의 하나로서 칩 형상에 따라 공구 날에 작용하는 응력 분포를 예상할 수 있다. 따라서 경사면의 기울기와 공구경로에 따른 절삭특성을 파악하고자 15°, 45° 경사면의 공작물을 절삭하였을 때의 칩 형상을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

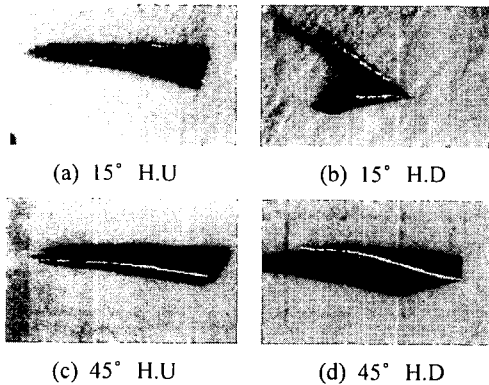


Fig. 3 Chip form according to tool path at cutting speed in 100m/min

Fig. 3의 15° 경사면에서 (b)수평·하방향일 때는 상향절삭과 하향절삭이 동시에 이루어지며, 절삭속도가 거의 "0"이 되는 공구 중심부위에서

절삭이 이루어지므로 불안정한 절삭특성을 가지고 칩 중간 부분이 떨어져 나간 형상을 가진다.

Fig. 4에는 45° 경사면에서 4가지 공구경로에 따른 칩 형상을 나타낸 것인데, 공구 경로에 따라 매우 다양한 형태로 나타난다. 그리고 공구 축의 상·하 흔들림이 발생하는 (c)수직·상방향과 (d)수직·하방향 절삭에서는 직사각형의 칩 모양으로서 공구에 집중 응력을 발생시킨다. 이러한 집중 응력은 절삭온도 및 공구 수명 등에 악영향을 끼친다. 또한 Z축의 상하 흔들림으로 칩에 축 흔들림 흔적을 남겼다. 그러나 (a)수평·상방향 절삭은 칩 모양이 긴 쐐기형의 삼각형으로서, 절삭시 공구날에 작용하는 응력을 분산시켜 안정적인 절삭상태를 나타내고 있다.

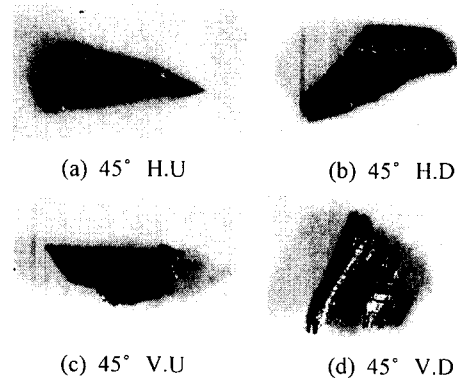


Fig. 4 Chip form according to tool path at cutting speed in 300m/min

3.2 공구경로에 따른 공구마멸 패턴

15°, 45° 경사면의 공구경로에 따른 공구마멸 형태를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 절삭속도 100m/min일 때 (b)수평·하방향에서 공구 중심부는 상·하향 절삭이 동시에 이루어지고, 좁은 범위에 과도한 절삭이 이루어져 중간부분에 집중적인 마멸이 이루어진다.

(c)와 (d)는 45° 경사면으로 15° 경사면보다 공구 외각부위에서 공구마멸이 생겼음을 알 수 있다. 그리고 공구마멸패턴을 살펴보면 수평·하방향의 경우 절삭부위 전구간에서 마멸이 일어나지만, 수평·상방향의 경우 절삭 외각부위에 집중적인 마멸이 일어남을 알 수 있다. 이러한 마멸이 나타나는 이유는 미소 절삭날에 미치는 칩 두

깨와 절삭부위의 안쪽과 바깥쪽의 절삭속도 차이에 의해 두드러지게 나타나는 것으로 생각된다.

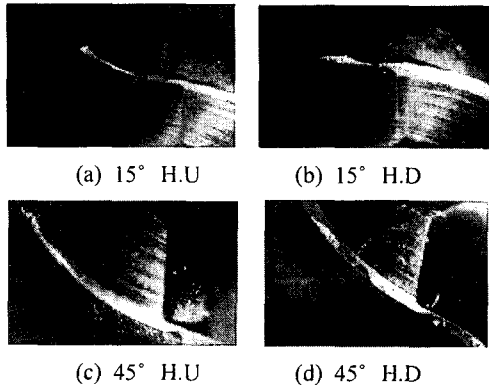


Fig. 5 Flank wear form according to tool path at cutting speed in 100m/min

Fig. 6은 절삭속도 300m/min일때 45° 경사면에서 수직·상방향의 경우 중앙 부분이 수직·하방향의 경우 절삭 부위의 아래쪽에 최대 마멸이 나타난다.

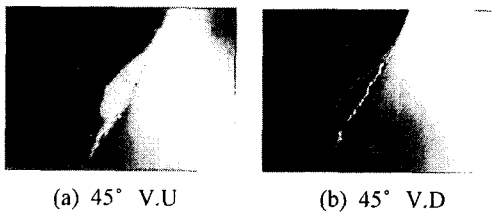


Fig. 6 Flank wear form according to tool path at cutting speed in 300m/min

3.3 공구경로와 절삭속도에 따른 공구 수명

경사면에서 공구경로 및 절삭속도에 따른 공구수명을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 절삭속도 100m/min으로 수평·상방향 및 수평·하방향에서 경사면 기울기 증가에 따른 공구수명을 나타내었다. 하향절삭과 상향절삭이 발생하는 15° 경사면의 수평·하방향에서는 공구 중심부위에서 절삭선속도가 '0'이 되어 절삭이 제대로 일어나지 않아 절삭길이 48m에서 플랭크 마멸이 0.3mm에 도달하였다.

Fig. 8은 절삭속도 300m/min으로 45° 경사면에서 4가지 공구경로에 따른 공구수명을 나타내

었다. 공구수명은 절삭속도 100m/min 일때 보다 훨씬 짧게 나타나고, 가공중 마멸초기 단계에서도 불꽃이 날리는 등 가혹한 절삭상태를 보였다. 공구 이송방향이 수직인 수직·하방향 및 수직·상방향 절삭에서는 공구 이송 중에 발생하는 공구 축의 상·하 흔들림으로 인해 공구의 치핑과 플랭크 마멸을 촉진시켜 공구수명에 악 영향을 끼친다. 그러므로 자유곡면의 가공에서는 공구 축의 상·하 흔들림이 없는 수평·하방향 및 수평·상방향으로 하는 것이 좋다.

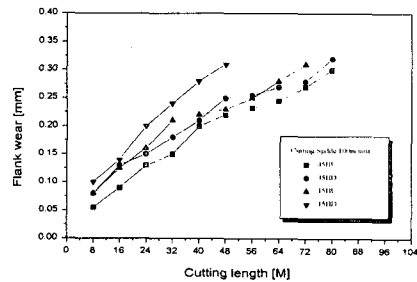


Fig. 7 Cutting length according to tool path at cutting speed in 100m/min

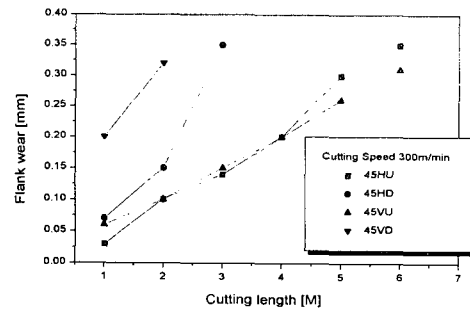


Fig. 8 Cutting length according to tool path at cutting speed in 300m/min

불 엔드밀링과 같은 단속절삭에서는 열 응력과 절삭력으로 표현되는 공작물과 공구의 마찰력에 의해 절삭이 이루어진다. 그러므로 가장 효율적인 절삭 및 공구수명 향상을 위해서는 마찰력을 최소로 해야하므로 불 엔드밀 절삭부위에서 일정한 범위 이상의 절삭속도로 유지할 필요가 있다.

또한 15° 경사면에서 수평·하방향 절삭에서는 하향절삭과 상향절삭이 동시에 발생하는 불안

정한 절삭상태를 나타내고 공구선단 부위에서 극심한 마멸이 생기므로 수평·상방향 절삭이 보다 효율적이다.

4. 결 론

공구 수명 향상과 가공시간 단축을 위해 경사면에서 절삭속도와 공구경로 변화에 따른 칩형상 및 공구수명과의 상관 관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유효 공구직경을 계산하고 이를 이용하여 경사면 변화에 따라 일정 절삭속도를 구하였다.
- 2) 공구 수명은 절삭속도에 상당한 영향을 받으며, 수직·상방향 및 수직·하방향은 공구 축의 상·하 흔들림으로 인해 공구의 칩핑과 플랭크 마멸을 촉진시키는 원인이 되어 공구 수명이 짧아짐을 알 수 있다.
- 3) 날부에 균일한 마멸이 이루어지는 15° 수평 상방향과 45° 수평 하방향이 효과적이며, 15° 수평·하방향절삭은 상·하방향절삭이 동시에 발생하고, 절삭속도 0'부분이 생겨 칩형상 및 공구수명 측면에서 적절한 가공방법이 아님을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Kishinami, T. et al, "A Theoretical analysis of Cutting Operation angle of Circular Cutting Edge Ball End Mill", J. of JSPE, Vol.47, No.11, pp.73~79, 1981
- 2) Kishinami, 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) 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
- 6) Waldemar R. Gaida, Ciro A. Rodriguez, Yusuf Altintas "Preliminary Experiments for Adaptive Finish Milling of Die and Mold Surface with Ball-Nose End Mills", Transactions of NAMRI/SME, Vol. 23, 1995