

볼 엔드밀의 반구면 절인 형상에 따른 정삭가공 특성 Finishing Characteristics According to Cutting Edge Shape on the Hemisphere Part in Ball End Milling

*조철용¹, 이여해², 유종선², #류시형³, 양균의³

*C. Y. Cho¹, Lihai Li², J. S. Yu², #S. H. Ryu(ryu5449@chonbuk.ac.kr)³, G. E. Yang³

¹군산대학교 자동차부품기술혁신센터, ²전북대학교 대학원 기계공학과, ³전북대학교 기계공학과

Key words : Ball end milling, Cutting edge, Helix angle, Lag angle, Tool wear, Surface roughness

1. 서론

볼 엔드 밀링은 자유곡면 금형의 정삭가공에 널리 사용되며 형상정밀도, 표면 거칠기 등 금형의 최종 품질을 결정하는 중요한 가공 공정이다. 볼 엔드밀은 복잡한 3차원 형상의 절삭날이 반구면 상에 형성되어 있어 공구날의 위치에 따라 절삭조건이 달라지기 때문에, 가공면 형상에 따른 가공조건 선정이 용이하지 않아 이를 주로 현장전문가의 경험에 의존하고 있다. 절입 깊이가 상대적으로 작은 볼 엔드밀 정삭가공에서 절삭은 주로 반구부의 절삭날에 의해 이뤄지며 이러한 경우 공작물과 절삭날의 접촉 위치에 따라서 칩 생성 기구가 달라진다. 볼 엔드밀 가공에 관한 연구로는 최적 공구경로의 생성을 통한 가공시간의 단축, 절삭 기구 해석을 통한 가공조건 선정, 형상정밀도와 표면 거칠기의 개선, 절삭력 및 공구변형의 예측과 가공오차 최소화, 고속가공에서의 절삭 특성, 공구마모 및 공구형상 최적화에 관한 연구들이 수행되었거나 현재 진행되고 있다.^{1,4} 본 연구에서는 볼 엔드밀 공구의 반구부 절삭날 형상에 따른 정삭가공 특성을 분석하기 위해, 볼 엔드밀의 헬릭스 각을 변화시킨 특수 공구를 제작하고 실험을 통하여 표면 거칠기와 공구마모 등 가공 특성을 살펴보았다. 이를 통해 볼 엔드밀의 최적 형상 설계에 대한 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 볼 엔드밀의 절삭 기구

볼 엔드밀을 이용한 자유곡면 정삭가공과 고속가공에서 절삭은 대부분 볼 엔드밀의 반구부 절삭날을 통해 이뤄진다. 이러한 경우 공구 실린더부의 절삭날은 절삭에 참여하지 않게 되며, 반구부 절삭날 생성을 위한 실린더 포켓부의 형성은 오히려 공구의 강성을 떨어뜨리는 작용을 하게 된다. 반구부에 형성된 절삭날의 형상은 공구 측면부에 형성된 절삭날의 헬릭스 각(helix angle)을 이어 내려와 볼의 정점부에 연결하면서 형성된 것으로 절삭날의 위치에 따라 헬릭스 각의 크기가 달라진다. 헬릭스 각의 크기에 따른 볼 엔드밀 반구부 절삭날의 형상과 칩 생성 기구는 Fig. 1과 같다. 반구부 절삭날의 형상에 따라 절삭날과 미변형 칩의 접촉 순서가 달라짐을 확인할 수 있다. Fig. 2는 반구부 절삭날 형상에 따라 임의 경사를 갖는 공작물 가공 시 절삭 기구 및 미변형 칩의 형상을 도식화한 것이다. 볼 엔드밀의 가공경로는 다양한 방식이 사용되나 일반적으로 Fig. 2와 같이 등고선 가공경로가 많이 채택된다. 이 때 공구의 이송방향은 경사면에 대하여 직각을 이루며, 이송이 끝나면 일정한 거리를 이동하여 재이송하는 방법으로 가공이 진행된다. 공구 이송방향에서의 절삭날 당 이송 거리와 이송에 수직인 방향에서의 경로간 간격(P_f)이 중요한 절삭 조건이 되며 기하학적으로 가공면의 형상과 표면 거칠기를 결정하는 요소이다. 경사면 볼 엔드밀 가공에서 최대 커슥 높이는 경로간 간격의 방향으로 식 (1)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 & \text{공구반경 } R \gg P_f \text{ 이고, 경사면 가공 } P_f' = \frac{P_f}{\cos\theta} \text{ 일 때,} \\
 & R^2 = (P_f'/2)^2 + (R - R_z)^2 \\
 & R_z = R[1 - \sqrt{1 - (P_f'/2R)^2}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

따라서, 최대 표면 거칠기 R_z 는 식 (2)로 근사화된다.

$$R_z = \frac{P_f'^2}{8R} \quad (2)$$

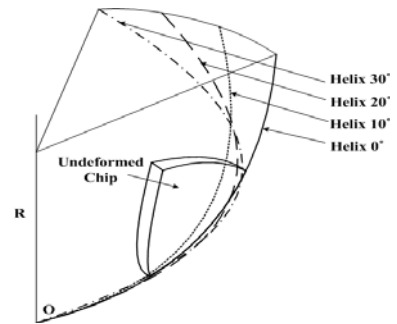


Fig. 1 Cutting edge shape on the hemisphere part according to helix angle variation

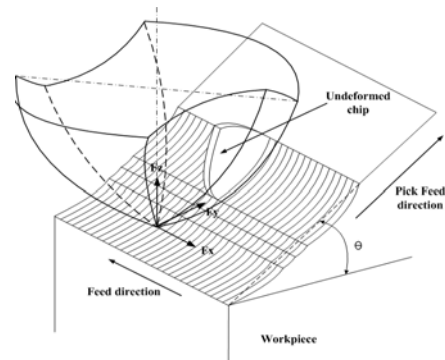


Fig. 2 Chip generation mechanism in ball end milling

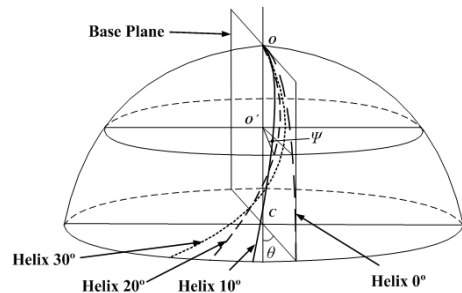


Fig. 3 Lag angle of cutting edge on the hemisphere part

반구부의 임의 절삭날 위치에서 지연각(ψ)은 Fig. 3에서와 같이 정의되며, 여기서 θ 는 공구회전각을 나타낸다. 현재 제작되고 있는 볼 엔드밀은 공구회전각에 대한 일정 리드의 조건으로 반구부 헬릭스 각이 설계되어 있다. 이로 인해 경사면 정삭가공 시 위치에 따라 순차절삭이 이뤄지지 않고 곡선 절삭날의 형태가 절삭에 참여하게 되어 순간 절삭력이 과도해지고 공구마모에 취약한 특성을 갖게 된다.

3. 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 공작물은 내마모성이 우수하고 조직이 균일하여 금형 재료로 널리 쓰이는 냉간 금형강 SKD-11이며, 경사각을 30°로 일정하게 제작하여 볼 엔드밀 절삭 실험에 사용하였다. 볼 엔드밀 반구부 절삭날의 헬릭스 각에 따른 절삭 특성을 살펴보기 위해, Table 1과 같이 실린더부의 헬릭스 각의 크기가 각각 0°, 10°, 20°, 30°인 두 날 초경 볼 엔드밀을 설계, 제작하였다. 볼 엔드밀의 재질은 텅스텐 카바이드이고, 공구 경사각 (rake angle) 은 0°로 일정하게 하였으며, 공구의 직경은 8 mm 이다. 반구부 절삭날 형상에 따른 절삭력, 표면 거칠기 및 공구마모 특성을 살펴보기 위해 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였다.

Table 1 Special ball end mill with different helix angle

Helix angle			
0°	10°	20°	30°

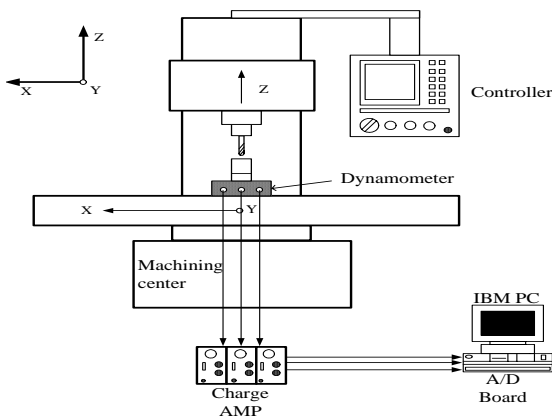


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

고속가공기인 MAKINO V33 머시닝 센터를 이용하여 실험을 수행하였으며, 절삭 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental cutting conditions

Test type	Surface Roughness	Tool Wear
Cutting method	Down Cutting	Down Cutting
Tool diameter	8 mm	8 mm
Cutting speed (RPM)	6,500	12,000
Feed per tooth (f_z)	0.15 mm	0.15 mm
Radial depth of cut (A_d)	0.3 mm	0.3 mm
Pickfeed (P_f)	0.3 mm	0.3 mm

4. 실험 결과 및 고찰

헬릭스 각 변화에 따른 가공면 표면 거칠기 (R_{max}) 를 Fig. 5에 나타냈다. 경로간 간격을 10 곳으로 나누어 표면 거칠기를 측정하였다. 공구경사각이 0°로 일정할 때, 실린더부 헬릭스 각 10°인 공구의 표면 거칠기가 가장 양호한 것으로 나타났다. 이는 헬릭스 각이 10°인 경우의 절삭날 형상이 하단부에서 상단부로 진행되는 순차절삭에 가장 근사한 형태가 되기 때문인 것으로 판단된다. 반면에, 실린더부 헬릭스 각이 20°, 30°인 경우에는 Fig. 1에서 보듯이 반구부 절삭날과 미변형 칩의 접촉부에서

순차절삭이 이루어지지 않는다. 공구마모의 측면에서도 헬릭스 각이 10°인 경우가 동일한 이유로 가공 특성이 가장 우수하였다.

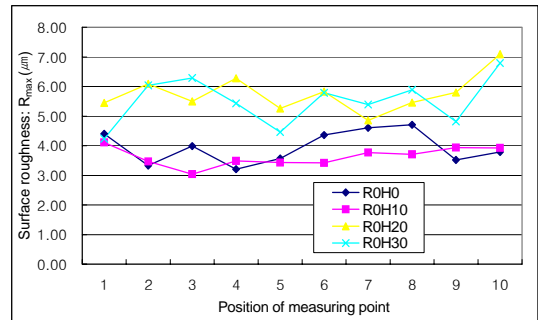


Fig. 5 Comparison of surface roughness according to helix angle variation

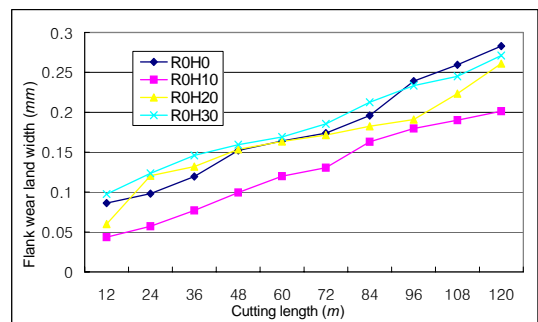


Fig. 6 Comparison of flank wear land width according to helix angle variation

5. 결론

볼 엔드밀의 반구부 절삭날 형상이 가공 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해, 헬릭스 각의 크기가 각각 다른 특수 공구를 제작한 후 경사면 가공 실험을 통해 표면 거칠기와 공구마모를 비교, 분석하였다. 헬릭스 각의 크기가 10°인 경우에 가공면 표면 거칠기가 가장 우수하였으며, 헬릭스 각이 0°인 공구 또한 20°, 30°인 경우 보다 양호한 표면 거칠기를 나타냈다. Flank 마모 측정을 통한 공구마모 실험에서 헬릭스 각 10°인 경우가 20°, 30°보다 공구마모 특성이 우수하였다. 이는 헬릭스 각이 10°인 경우의 반구부 절삭날 형상이, 본 실험조건에서 순차절삭이 일어나는데 가장 근접한 조건이기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 현재 일정 리드 조건으로 반구부 헬릭스가 형성되고 있는 볼 엔드밀 설계 공정은, 공작물의 경사각 및 절삭 조건을 고려하여 순차절삭이 이뤄지도록 반구부 절삭날 형상이 개선될 필요가 있다.

참고문헌

- Iwabe, H., Fujii, Y., Saito, K. and Kisinami, T., "Analysis of Cutting Mechanism and New Cutting Method at Inside Corner," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 55, 841-846, 1989.
- Aoyama, H., Kisinami, T. and Saito, K., "Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 53, 461-466, 1987.
- Lee, P. and Altintas, Y., "Prediction of Ball-End Forces from Orthogonal Cutting Data," Int. J. of Mach. Tools Manufact., 36, 1059-1072, 1996.
- Jin, K., Tsukasa, K., Shunichi, K. and Satoru, I., "Wear Estimation of Ball End Mill and Its Application to Precision Machining of Curved Surface," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 67, 1427-1431, 2001.