

볼 엔드밀의 고속가공에서 가공능률을 고려한 가공조건의 선정

Determination of the Cutting Condition in High Speed-Machining Considering the Machining Efficiency

손창수(부산대 원), 강명창(부산대 기계기술연구소), 김정석 이득우(부산대 ERC/NSDM), 황경현(KIMM)

Abstract

Due to the high feed rate, high speed machining (HSM) provide a great potential of rationalization for the machining Dies and Moulds. But determination of cutting condition is very difficult, because cutting mechanism of high speed machining is very complicated, especially using ball end-mill.

This paper gives a report on selection of the optimal cutting condition to improve the machining efficiency, And optimal machining condition is determined through the cutting force, FFT analysis of cutting force and surface roughness according to the cutting condition. Based on this experiment result, wear process and machining characteristics are evaluated.

Key Words : High Speed Machining (고속 가공), Ball End-mill (볼 엔드밀), Cutting Condition (가공 조건), Cutting Force (절삭력), Surface Roughness (표면 거칠기), Tool Wear (공구마멸),

1. 서 론

산업의 급속한 발전과 더불어 국내의 금형업체에서도 국제 경쟁력을 재고하기 위해 난삭성 금형소재의 고정밀 및 고능률가공에 대한 요구가 급증하고 있다. 이러한 금형 가공의 능률과 정밀도 향상을 위해 최근 고속가공에 대한 연구가 진행되고 있는데 이 고속가공은 생산성 향상과 매우 밀접한 관계에 있으며, 자동차, 항공기, 전기·전자산업등에 적용되고 있다.⁽¹⁾

특히 최근의 복잡한 3차원 금형의 제작을 위해서 볼 엔드밀이 많이 쓰이는데 볼 엔드밀의 기하학적 형상의 특징으로 인해 공구의 절삭 날에 걸쳐 절삭 특성이 달라지고,⁽²⁾⁽³⁾ 소비자의 다품종 소량 생산의 요구에 의해 금형의 수명사이클이 짧아지면서 금형의 재질에 따른 고속가공의 가공성 평가가 요구된다. 다인 공구의 단속절삭에서 범용절삭과 고속절삭의 구분은 가공방식, 피삭재질, 공구재종, 공구형상, 가공형상 등에 의해 달라지는데⁽⁴⁾ 절삭속도의 고속화는 절삭능률의 향상이라는 이점이 있는 반면, 절삭공구의 수명단축과 불안정성이라는 단점을 동반한다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 그러므로 이러한 고속가공에서 생산성과 가공 안정성을 고려한 최적의 가공조건 선정과 이때

의 가공성을 평가할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 고속가공의 절삭 매커니즘을 파악하기 위해 프리하든강의 일종인 HP-4M금형강을 가공정도 및 가공능률을 고려한 여러가지 가공조건으로 고속가공하여 가공면의 표면거칠기, 표면형상, 절삭력 및 공구마멸등의 가공성 평가를 통해 금형의 품질향상과 가공시간 단축 등을 통해 생산성 향상을 위한 최적의 절삭조건을 선정하고자 한다.

2. 실험 방법 및 조건

고속가공을 이용한 금형제작시 가공시간은 이송속도(Feed Rate)와 축방향 절삭깊이(Axial Cutting Depth, Ad) 및 공구 경로당 이송량(Pick Feed, Pf)의 가공조건과 CAD/CAM에 의한 공구경로(Tool Path)와 비 절삭시간(Lead Time)에 의해 결정된다. 이에 스피들의 고속회전시 이송속도와 공구 경로당 이송, 그리고 축방향 절삭깊이등의 가공조건의 변화에 따른 절삭력과 표면 거칠기 등의 절삭성을 알아보기 위해 실험조건을 나타낸 Table 1의 Type 1과 Type 2의 조건에서 가공조건의 변화에 따른 가공성 평가 실험을 실시하였다.

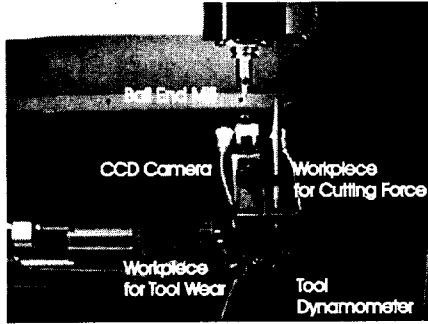


Fig. 1 Experimental Set-up

Fig. 1은 본 실험을 위한 실험장치도를 나타낸 것으로 볼 앤드밀(TiCN Coating Ball End-mill)을 이용하여 평면 하향절삭(Down-Cut)을 실시하고, 공구동력계(Kistler 9257B)를 공작물의 밑에 장착하여 절삭력을 획득한 후, 가공이 끝난 후에 표면조도기(Form Talysurf Series II, RANK TAYLOR HOBSON)를 이용하여 각 조건에 대한 공작물(HP-4M)의 표면거칠기를 측정하였다. 각 실험에 대한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Cutting Condition

	Spindle Revolution (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Feed per Revolution (mm/rev)	Axial Cutting Depth (mm)	Pick Feed (mm)
Type 1	8000	2800	0.350	0.4	0.2
		3000	0.375		
		3500	0.438		
		4000	0.500		
		4500	0.563		
5000	0.625				
Type 2	8000	4000	0.500	0.4, 0.6, 0.8	0.2, 0.5, 0.8
Type 3	8000	4000	0.500	0.6	0.5

또한 공구마멸의 측정을 통한 가공특성 평가실험에서는 Table 1의 Type 3의 가공조건에서 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 공구마멸용 시편으로 공구(TiAlN Coating Ball End-mill)의 마멸이 일정량 만큼 진행될 때 까지 가공한 후 절삭력과 표면거칠기를 측정하기 위한 시편으로 6mm정도 가공하면서

절삭력을 획득한 후 공구의 마멸을 CCD카메라를 이용하여 온라인(On-Line)상으로 관측하였고 조건마다의 표면거칠기는 실험을 끝낸후 표면 조도기를 이용하여 공구마멸에 따른 표면거칠기를 측정하였다.

3. 고속가공의 절삭조건에 따른 실험결과 및 고찰

3.1 이송속도의 변화에 따른 절삭성 평가 실험

이송속도의 증가에 대한 절삭력의 파형과 그 주파수값을 Fig. 2에 나타내었다.

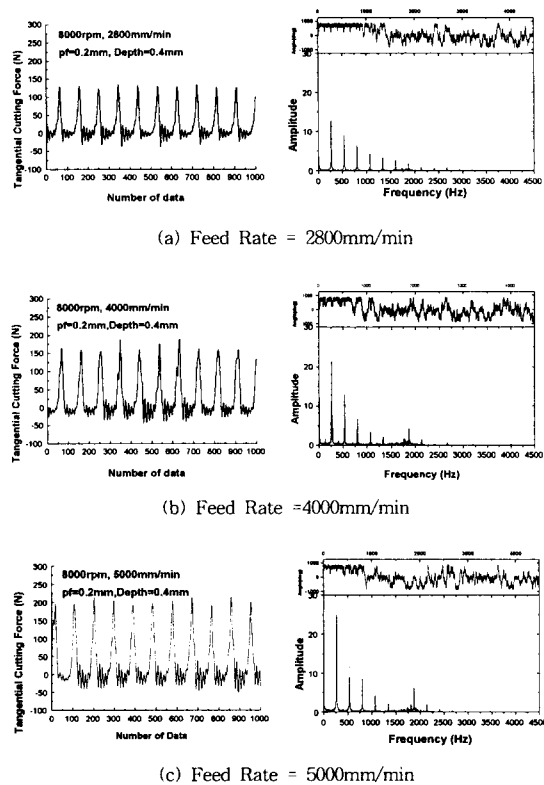


Fig. 2 Cutting Force signal and FFT Analysis according to Feed Rate

절삭력을 주파수 분석한 결과 이송속도가 2800 mm/min일 때에는 절삭 주파수(267Hz)와 이에 의한 조화(harmonic)성분이 주를 이루지만, 이송속도가 4000mm/min으로 증가하면서 절삭 주파수와 조화 성분 외 약 1869Hz의 고주파 성분이 발생하고, 이송속도가 5000mm/min일 때는 고주파 성분의 급격한 증

가를 가져온다. 이는 과도한 이송속도로 인해 공구의 날당 이송량이 커지면서 공구의 떨림 등으로 인해 채터진동(Chatter Vibration)과 같은 가공의 불안정을 유발하기 때문인 것으로 생각된다.

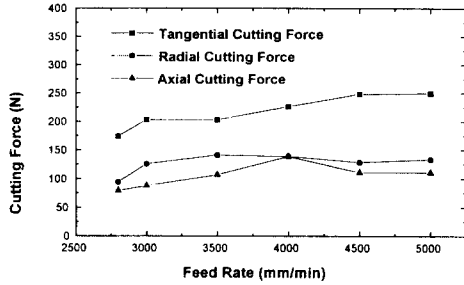


Fig. 3 Characteristics of Cutting Force according to Feed Rate

Fig. 3은 이송속도의 증가에 따른 절삭력 3분력의 변화를 나타낸 것으로 이송속도가 증가함에 따라 이송방향의 절삭분력이 서서히 증가한다.

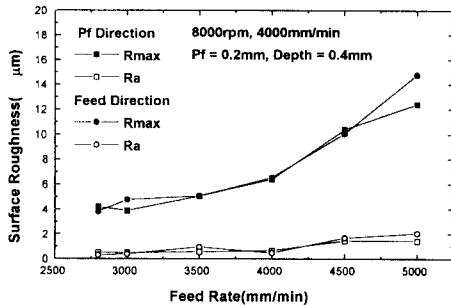


Fig. 4 Characteristics of Surface Roughness according to Feed Rate

Fig. 4는 이송속도의 증가에 따른 이송방향과 공구경로 방향의 표면거칠기를 나타낸 것으로, 이송속도가 4000mm/min까지는 표면거칠기가 서서히 증가하다가 그 이상에서는 급격하게 나빠짐을 알 수 있다. 이는 표면 거칠기에 따른 임계 이송속도가 존재한다는 것을 보여주고 있다.

3.2 공구경로당 이송량의 변화에 따른 가공특성

공구 경로당 이송량의 변화에 따른 절삭력의 주파수값과 이송방향 분력에 대한 반경방향분력의 리사

쥬 파형(Lissajous' figure)을 Fig. 5에 나타내었다.

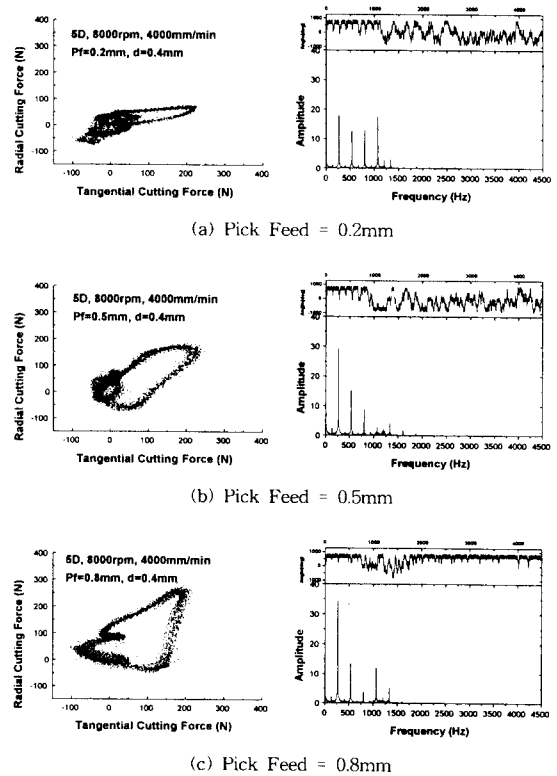


Fig. 5 Lissajous' figure of Cutting Force (X-Y) and FFT analysis according to the Pick Feed

절삭력의 주파수분석 결과 공구의 1회전당 이송량과 공구경로당 이송량이 0.5mm로 같을 때 가장 안정적이라는 것을 알 수 있고 이송방향분력에 대한 반경방향분력의 리사쥬 파형을 살펴보면 공구경로당 이송량이 증가함에 따라 절삭력의 반경방향 분력이 크게 증가함을 알 수 있다.

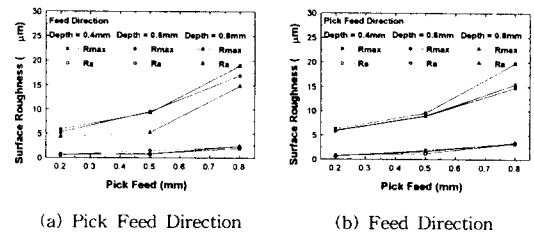
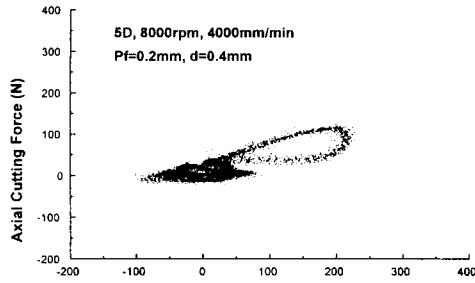


Fig. 6 Characteristics of Surface Roughness according to Pick Feed

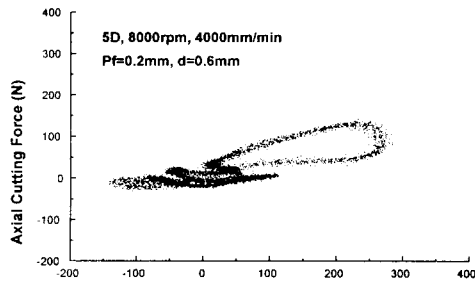
Fig. 6은 공구경로당 이송량의 변화에 대한 이송 방향과 공구경로 방향의 표면거칠기를 나타낸 것으로, 공구경로당 이송이 0.5mm이상일 때는 표면거칠기가 급격히 증가함을 알 수 있다.

3.3 축방향 절삭깊이에 따른 가공특성

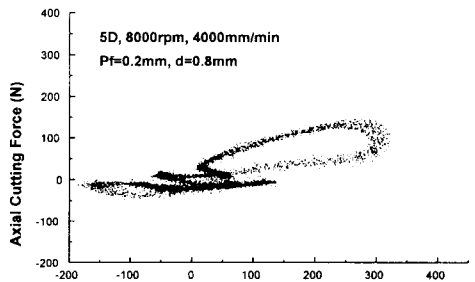
축방향 절삭깊이의 변화에 대한 이송방향과 축방향 절삭력의 리사주 파형을 Fig. 7에 나타내었다



(a) Axial Cutting Depth = 0.4mm



(b) Axial Cutting Depth = 0.6mm



(c) Axial Cutting Depth = 0.8mm

Fig. 7 Lissajous' figure of Cutting Force (X-Z) according to the Cutting Depth

축방향 절삭깊이가 증가함에 따라 축방향 분력에 비해 이송방향 분력이 상당히 커짐을 알 수 있다. 따라서 축방향 절삭깊이가 커지면 이송 방향으로 공구의 절삭날에 큰 부하가 걸려 공구의 수명에 악영향을 끼칠 수 있으므로 적절한 축방향 절삭깊이의 선정이 필요하게 된다.

3.4 공구마멸에 의한 가공특성 평가

공구마멸이 진행될 때의 절삭력의 3분력의 변화와 절삭깊이에 따른 공구마멸의 진행을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

공구마멸이 진행됨에 따라 절삭력은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이지만 공구의 마멸은 0.2mm에서부터 급격하게 커지는 것을 볼 수 있는데 이러한 공구의 급격한 마멸로부터 주어진 가공조건에서의 공구수명을 알 수 있게 된다.

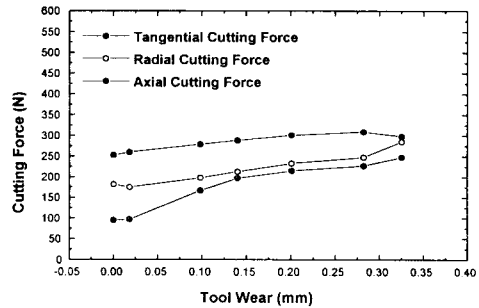


Fig. 8 Characteristics of Cutting Force according to Tool Wear

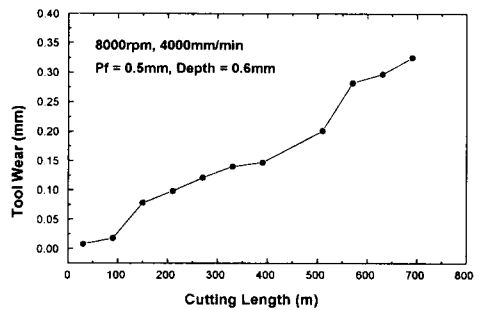


Fig. 9 Characteristics of Tool Wear according to Cutting Length

주어진 가공조건에서 공구의 마멸에 따른 공구마

멸 형태와 이 때의 가공표면의 형상과 절삭력의 구분력인 이송방향 분력과 반경방향 분력의 리사쥬 파형을 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

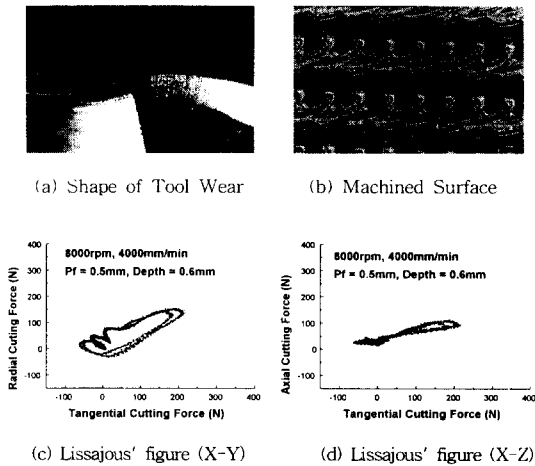


Fig. 10 Characteristics of Tool Wear, Machined Surface and Lissajous' figure When Tool Wear is 0.008mm

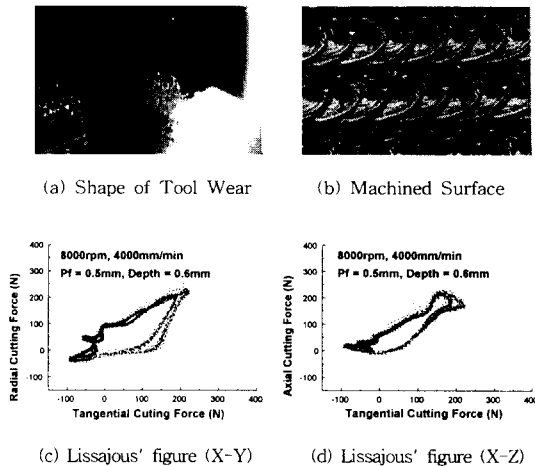


Fig. 11 Characteristics of Tool Wear, Machined Surface and Lissajous' figure When Tool Wear is 0.297mm

가공이 진행됨에 따라 공구의 마멸이 처음에는 모든 절삭날에 걸쳐 골고루 진행하다가 공구마멸이 진전되면서 공구의 절삭날 끝부분에 노치마멸로 생각되어지는 이상마멸이 갑자기 발생하기 시작하여 이

후의 공구마멸의 주를 이루게 된다. 이는 절삭유에 의해 공구의 날끝이 절삭에 의한 발열과 절삭유로 인한 냉각이 반복되면서 공구의 날 끝에 열적 충격이 반복적으로 가해지거나 발생된 열이 공작물의 표면에 머물러 있는 절삭유로 인해 외부로 빠져나가지 못하면서 공구의 절삭날에 열·화학적 반응을 일으켜 발생하는 것으로 사료된다. 공구의 마멸과 함께 가공표면의 형상사진을 관측할 때 공구의 날이 지나간 흔적인 절삭 흔(Marker)이 공구의 마멸이 거의 없는 Fig. 10(b)에서는 잘 나타나고 있고 이 때 절삭 흔 사이의 간격은 공구의 경로당 이송량과 같은 값인 0.5mm가 된다. 하지만 공구의 마멸이 진행함에 따라 불량한 가공표면이 생성됨을 볼 수 있다. 이때의 절삭력의 리사쥬 파형을 살펴보면 공구마멸이 진행되면서 이송방향 분력보다는 반경방향 분력과 축방향 분력의 증가가 크게 됨을 알 수 있다.

4. 결론

볼 엔드밀을 이용한 고속 가공에서 높은 이송속도에 의한 생산성 향상은 가공 안정성 실험을 통한 적절한 공구 경로당 이송량과 축방향 절삭깊이등의 가공조건 선정을 통해서 이루어 질 수 있음을 알 수 있다. 또한 실제 가공성 평가 실험을 통해 절삭력과 절삭력의 주파수 분석값 및 표면 거칠기를 이용하여 주어진 스피들 회전수에서 생산성 향상을 위한 이송속도와 공구 경로당 이송량 및 축방향 절삭깊이를 결정하였고 선정된 가공조건에서 공구 마멸에 의한 가공특성을 평가하였다.

참고 문헌

- 1) T. Moriwaki, "High-Speed Maching", CIRP, Vol.41/2/1992.
- 2) H. Schult, "High-Speed milling of Dies and Moulds - Cutting Conditions and Technology", CIRP, Vol.44/1/1995.
- 3) T. Ikeda, "高速・高精度切削をう工作機械と 狙加工技術", 型技術セミナー, 1995
- 4) K. Okuni, "超高速切削加工を可能にする工具材種", 型技術セミナー, 1992
- 5) T. Ikeda, "高速切削の現状と技術動向", 型技術セミナー, 1992
- 6) 有本 浩, "工具から見た高速切削の現状と課題", JSPE, 第210回講習會, 1994
- 7) 内勝國雄 外 5人, "金型の高品位・高能率仕上切削法の開発", JSPE, 1993-04-649