

볼 앤드밀을 이용한 금형가공에 있어서 이송 속도 최적화에 대한 연구

A Study on the Feed Rate Optimization in the Ball End-milling Process
Regarding of Tool Path and Workpiece Shape

김성윤*(서울대 대학원), 조영학(서울대), 김병희(강원대 정밀기계공학과),
주중남(서울대 기계설계학과)

Abstract

In the ball end-milling process of a 3-dimensional mold, it is important to select cutting conditions and tool path considering the geometrical shape of a workpiece to reduce machining time. In this study, experiments were performed to decide allowable feed rate not breaking stability of system for different geometrical shapes. It was found that downcut is more stable than upcutting in machining side wall and downward is preferable to upward in inclined part depending on the angle of the inclination and depth of cut.

keywords : cutting characteristics(절삭특성), cutting geometry(절삭기하), dynamic stability(동적 안정성), limit spindle speed(한계주축회전수), optimal feed rate(최적이송속도)

1. 서 론

기계가공기술의 급속한 기술적 진보에도 불구하고 3차원형상(3-dimensional shape)을 가진 복잡한 형상 금형의 가공은, 먼저 일정한 오프셋(offset)을 가지는 주몰을 3축 공작기계에서의 NC를 이용한 일련의 절삭가공(cutting process)을 통해 형상위주의 가공을 수행한 후 수작업자의 연삭(grinding), 연마(polishing), 혹은 방전가공(EDM) 등을 사용하여 요구되는 정밀도를 획득하는 후처리 가공 공정을 거치는 방법을 취하고 있다. 이러한 형상중심의 NC가공방법은 가공형상 및 절삭조건, 재료 등의 변화에 따른 절삭특성의 변화에 유연하게 대처하지 못함으로 인하여 생산성 향상에 한계가 있어 왔다.

더우기, 일반적인 CAD·CAM 시스템에 있어서 가공 현상에 대한 이해부족과 프로그래밍상의 편의를 도모하기 위하여 특별한 경우를 제외하고는 황삭(roughing), 정삭(finishing), 코너부가공(cornering), 측벽가공(ramping) 등에 있어서 공구의 크기나 절삭기하, 가공재료의 종류 등 가공조건에 따른 절삭특성들과는 무관하게 주축회전수와 이송속도를 사용하여 가공 데이터를 생성하기 때문에 [1][2], 이러한 경우 생산성의 저하 또는 지나치게 무리한 가공조건을 기계에 부과함으로써 작업도중에 과도한 소

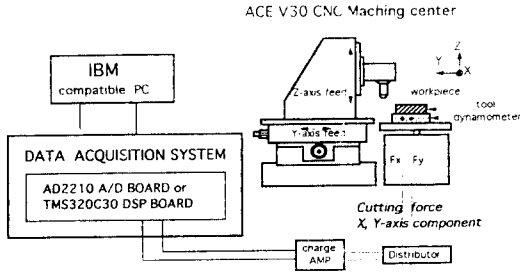
음, 공구의 손상, 칩제거의 어려움, 유지보수 및 고속이송시의 안정성 등 여러 문제점이 발생하게 되어, 대부분의 경우에 있어서 현장 작업자들의 경험에 의한 가공 조건 수정이 필요 불가결하였다.

따라서 본 연구에서는 가공 속도의 최적화를 통한 생산성 제고를 위하여 상향절삭(upcut)과 하향절삭(downcut), 상방향절삭(upward machining)과 하방향절삭(downward machining) 및 공구경사각(cutter inclination angle) 등 각종 가공기하의 변화에 따른 절삭특성을 연구하여[3][4], 형상에 따른 정적·동적 가공특성을 분석함으로써 최적의 가공조건을 설정하기 위한 기초 데이터 베이스를 확보하고, 궁극적으로는 이를 이용한 최적화 프로그램을 개발하여 순수가공시간을 줄임으로써 생산성을 향상시키고 생산비용을 절감하고자 하였다.

2. 실험 장비 및 방법

본 연구에서는 대우중공업의 ACE-V30 머시닝 센터를 사용하여 시작제품용 금형소재인 아연합금소재 ZAS를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험장비는 머시닝센터, 절삭력 측정장치, 데이터 취득 및 처리장치의 세부부분으로 구성되어 있으며[5], 절삭력 측정장치로는 밀링용 공구동

력계인 kethley 9257B를, 데이터 취득장치로는 AD2210 A/D Board, TMS230C30 DSP Board와 개인용 PC를 사용하였다. 그 구성도를 아래의 <그림.1>에 나타내었다.



<그림.1> 실험 장비의 개략도

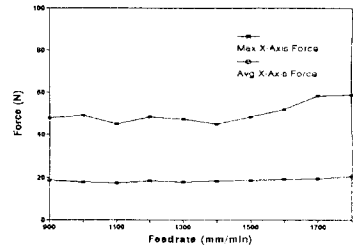
이러한 실험장치를 이용하여, 먼저 최적의 가공조건을 찾기 위해 일정 날당 이송에 대하여 증가시킬 수 있는 이송속도의 한계를 설정하기 위한 실험을 수행하였다. 이와 동시에 주축회전수의 증가에 따라 가공계가 어떠한 거동을 보이는가를 분석하여 가공계의 동적 안정성이 확보될 수 있는 최대 주축회전수를 결정하고 이를 기준으로 이송속도의 증가에 상한 기준을 삼고자 하였다. 절삭깊이는 일반적으로 정삭가공에서 사용하고 있는 0.5mm를 채택하였고, 최적의 경로간 거리를 선정하기 위하여 이를 변화시키면서 가공을 행하고 이에서 얻어진 가공 표면을 Talysurf 접촉식 표면거칠기 측정기를 이용하여 표면거칠기를 측정함으로써 가공성을 고려한 최적의 이송간 거리를 선정하였다. 이렇게 결정된 가공 조건들을 사용하여 각종 가공기하에 따른 가공을 수행함으로써 여러 가공형상에 따른 최적의 이송속도를 결정하고자 하였다.

3. 실험 결과

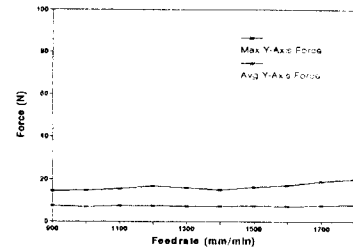
3-1. 이송속도 변화에 따른 계의 거동

본 실험에서 사용한 절삭속도는 일반속도절삭 (conventional speed machining) 영역인 약 40~90mm/min 정도이며, 이 영역에서는 평균절삭력이 절삭면적에 비례하는 특성을 보이고 있다. <그림.2>는 날 당 이송량을 0.2mm/tooth로 일정하게 유지하면서 이송속도와 주축회전수를 증가시켰을 경우의 X, Y 방향의 절삭력 데이터이다. 이를 보면, 동일 날 당 이송을 유지할 경우 이송속도의 증가가 계의 안정성에 미치는 영향은 미소하다 할 수 있다. 그러나, 이송속도가 1500mm/min (주축속도 :

3500rpm) 이상이 될 경우에는 주축회전수의 증가 등으로 인하여 계의 불안정성이 발생하고 있다. <그림.3>에 X 축 방향의 절삭력을 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하여 나타내었다.

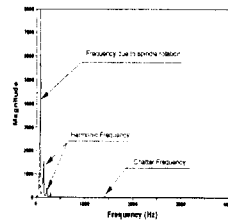


(a) X방향 절삭력(이송에 수직한 방향)

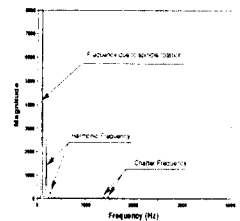


(b) Y방향 절삭력(이송방향)

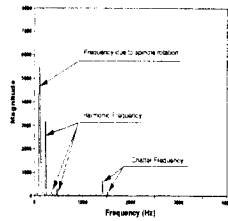
<그림.2> 이송 속도 증가시의 절삭력의 변화 (날 당 이송 : 0.2 mm/tooth)



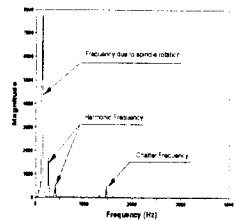
(a) 이송속도 : 900, 회전수 : 2250



(b) 이송속도 : 1100, 회전수 : 2750



(c) 이송속도 : 1400, 회전수 : 3500



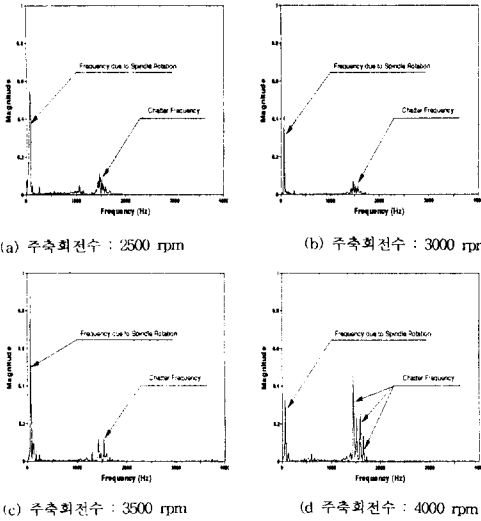
(d) 이송속도 : 1600, 회전수 : 4000

<그림.3> X 방향 절삭력의 주파수 분석 결과 (날 당 이송 : 0.2 mm/tooth)

3-2. 주축회전수의 증가에 따른 계의 거동

주축회전수가 계의 안정성(stability)에 미치는 영향을 보다 자세히 관찰하기 위하여 이송없이 주축회전수만 변

화시키는 무부하 절삭(zero-cutting)을 수행하여 FFT 처리하여 보았다. <그림.4>에 이송속도를 1500mm/min으로 일정하게 유지하면서 주축회전수를 변화시킬 경우, 이송을 정지한 후 공회전이 시작하는 순간의 X방향의 절삭력 데이터를 FFT 처리한 것을 나타내었다. 주축회전수가 증가함에 따라 채터 주파수인 1.5kHz에서의 주파수 크기가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 4000rpm의 경우에는 매우 극심한 채터현상이 발생함을 볼 수가 있다.



(a) 주축회전수 : 2500 rpm (b) 주축회전수 : 3000 rpm
(c) 주축회전수 : 3500 rpm (d) 주축회전수 : 4000 rpm

<그림.4> 공회전시 주축회전수의 변화에 따른 절삭력 변화의 FFT 결과

3-3. 경로간 간격에 따른 표면 거칠기의 변화

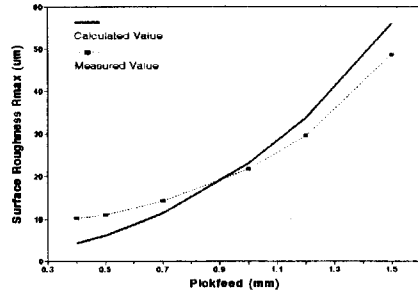
<그림.5>는 이송속도를 1000mm/min으로 하고 주축회전수를 2400rpm으로 하였을 때 경로간 간격(path interval, pick feed)을 변화시키며 가공하였을 경우 커스프의 이론적 높기와 측정값을 비교한 결과이다. 이를 보면 경로간 간격이 감소함에 따라 표면 거칠기값도 감소하는 경향을 보이고 있지만, 그 감소 기울기는 점차 둔해지고 있음을 알 수 있다. 이는 경로간 간격이 감소할수록 절삭속도의 감소와 문지름(rubbing phenomenon)으로 인해 정상적인 칩형성기구(chip formation mechanism)가 이루어지지 못하기 때문이다. 또한, 이러한 문지름현상은 공구의 수명에도 좋지않은 영향을 미치므로 경로간 간격의 감소에는 한계가 있음을 알 수 있다.

3-4. 측벽 가공시의 가공 특성

볼 엔드밀을 사용하여 측벽 및 경사면을 가공할 경우에

는 절삭력의 합력 성분이 공구의 측방향과 이루는 각이 증가하므로 공구에 작용하는 굽힘 모멘트(bending moment)의 값이 증가하여 가공이 불안정하여 진다. 이 경우 공구는 쉽게 채터를 발생하여 표면거칠기의 악화와 소음의 발생 및 공구의 손상을 야기시키므로 측벽의 각도에 따라 이송속도를 변화시켜야 한다. <그림.6>에 절삭깊이 0.5mm, 주축회전수 3000rpm, 경로간격 0.8mm의 절삭 조건하에서 이송속도를 변화키면서 측벽을 하향 절삭 가공하였을 경우의 발생하는 절삭력의 주파수 분석 결과이다. 이를 보면 측벽가공에 있어서는 같은 절삭조건일 지라도 측벽의 경사가 급해질수록 안정적인 이송속도는 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 절삭가공이 공구의 바깥쪽 부위에서 발생하여 중심부에 비하여 빠른 절삭속도로 가공이 이루어지지만, 회전축과 절삭력이 이루는 각도가 증가하기 때문에 공구에 가하여지는 굽힘모멘트가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

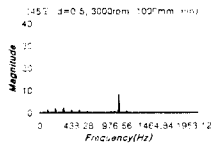
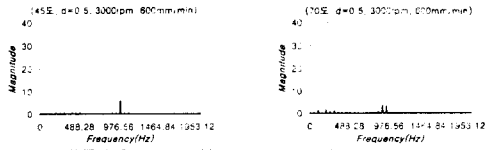
또한, 측벽의 가공에 있어서 상향절삭과 하향절삭에 따라서도 절삭특성에 차이가 있으며, 이를 <그림.7>에 나타내었다. 이를 보면, 측벽가공에 있어서 하향절삭이 상향절삭보다 안정한 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 상향절삭의 경우가 하향절삭의 경우보다 초기 절삭이 이루어지지 않기 때문에 공구와 공작물사이의 마찰이 증가하여 채터링의 발생이 보다 용이하여 졌기때문으로 판단된다.



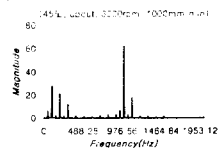
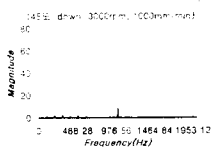
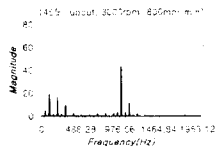
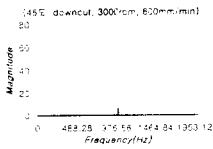
<그림.5> 경로간 간격의 변화시의 커스프 변화

3-5. 경사면 가공시의 가공 특성

<그림.8>과 <그림.9>는 경사면의 상방향 절삭과 하방향 절삭시에 발생하는 절삭력 주파수 분석 결과로 이송속도의 증가에 따라 채터의 주파수 크기가 증가함을 알 수 있으며, 경사면의 기울기가 증가할 경우에는 안정된 절삭을 수행할 수 있는 이송속도의 크기가 급격히 작아지게



(a) 축벽 기울기 : 45도 (b) 축벽 기울기 : 75도
 <그림.6> 축벽가공시의 기울기에 따른 주파수분석 결과

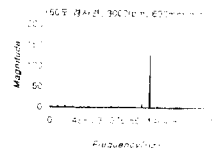
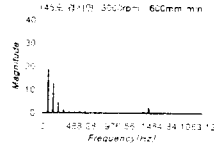


(a) 하방절삭 (b) 상방절삭

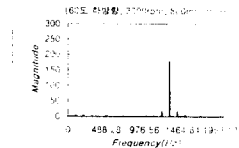
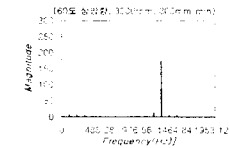
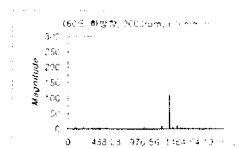
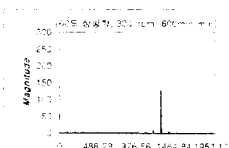
<그림.7> 축벽가공시의 하방절삭과 상방절삭의 비교 (축벽기울기 : 45도)

된다. 이는 축벽가공에서와 같이 경사가 급해질수록 공구와 절삭력이 이루는 각도가 증가하여 채터를 발생시키는 굽힘모멘트가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 경사면의 경우가 축벽가공의 경우보다 기울기의 변화에 더욱 영향을 받는 것으로 나타나 공구의 회전축 방향의 강성이 회전축에 수직인 방향의 강성보다 작은 것을 알 수 있다.

한편, 하방향 절삭이 상방향 절삭보다 가공이 경사면가공에 있어서 보다 안정적인 것으로 결과가 나타났다. 이는 하방향 절삭의 경우 절삭깊이가 일정값보다 작을 경우에는 절삭이 공구의 중심부위에서 발생하지 않기 때문에 하방향의 이송에 따른 절삭력의 증가는 일어나지 않으며 절삭력 합력의 방향과 공구의 회전축이 이루는 각도가 작아짐으로 인하여 하방향 이송의 경우보다 채터링의 발생이 억제되기 때문으로 판단된다. 따라서, 동일한 가공조건을 가진 경사면이라도 이송의 방향에 따라 이송속도의 차이를 달리 선정하여야 함을 알 수 있다.



(a) 경사면 기울기 : 45도 (b) 경사면 기울기 : 60도
 <그림.8> 경사면의 상방향 절삭가공시의 기울기에 따른 가공 특성



(a) 상방향 절삭 (b) 하방향 절삭

<그림.9> 경사면의 상·하방향 절삭시의 주파수분석의 결과 비교

4. 결 론

볼 엔드밀을 사용한 3차원 복합 형상 가공에 있어서 공구와 공작물사이의 접촉기하의 변화에 따른 가공상황의 변화에 유연하게 대처하는 절삭조건을 생성할 경우에 가공의 신뢰성과 생산성을 향상 시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 가공형상에 따른 최적의 절삭 조건을 선정하기 위한 절삭기하에 따른 가공특성에 대한 실험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 일반 절삭속도 영역의 가공에서는 동일 날 당 이송을 유지할 경우에는 이송속도의 증가가 계의 안정성에 미치는 영향은 미소하나, 절삭계의 강성에 따른 주축회전수의 증가 한계가 존재함을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 ACE-V30의 경우에는 3500rpm 이상으로 주축회전수를 증가시키면 800~1.2kHz 정도의 채터가 발생하는 것을 관찰할 수 있어, 한계주축회전수를 약 3000rpm으로 정하였다. 경로간 간격의 변화에 따른 가공면의 표면거칠기는 경로간 간격이 어느 정도 작아지면, 더 이상의 표면거칠기의 감소는 이루어지지 않아 정삭 가공에 있어서 최적 경로간 간격이 존재함을 알 수 있었다. 측벽 가공에 있어서는 측벽의 기울기가 증가할수록 가공계의 안정성은 낮아지므로 이송속도를 낮추어야 하며, 상향절삭(upcut)이 하향절삭(downcut)보다 측벽가공에 있어서는 안정하지 못하므로 측벽 가공 경로 생성에 있어서 지그재그의 경로 방법은 바람직하지 않은 것으로 결과나 나타났다. 또한, 경사면의 가공에 있어서는 경사면의 기울기가 증가함에 따라 가공의 안정성은 급격히 악화되는 경향을 보이고 있으며, 상방향 가공

(upward cutting)이 하방향 가공(downward cutting)이 더욱 채터가 발생하기 쉬운 것으로 결과가 나타났다.

5. 참고 문헌

- [1] 최병규, 'CAM 시스템과 CNC 절삭가공', 청문각, 1989
- [2] Chang and Melkanoff, 'NC Machining Programming and Software Design', *Prentice-Hall Inc.*, 1989
- [3] E.M.LIM, H.FEGN, C.MENQ, Z.LIN, The Prediction of Dimensional Error For Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process - Part.1 : Chip Geometry Analysis and Cutting force Prediction, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.35, No.8, pp.1149-1169, 1995
- [4] E.M.LIM, C.MENQ, The Prediction of Dimensional Error For Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process - Part.2 : Surface Generation Model And Experimental Verification, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.35, No.8, pp.1171-1185, 1995
- [5] 이장무, 허일규, 권원태, 주종남, 밀링공정에서의 이송축 모터전류를 이용한 공구파괴 감시, *정밀공학회지*, 제12권 13호, 1995.12, pp.62-73