

볼엔드밀 가공시 이송변화에 따른 가공형상 특성

왕덕현*, 김원일*, 이윤경*, 임채열**, 우정윤**, 박창수**

Machined Profile Characteristics for Feedrate Change in Ball End Mill Cutting

Duck-Hyun Wang*, Won-Il Kim*, Yun-Kyeong Lee*, Chae-Yeol Lim**, Jung-Yun Woo**, Chang-Soo Park**

Abstract

Due to the development of the CNC machine tool and CAM software, sculptured surface machining can be broadly used in die and mold industries and ball end milling process is often used for the sculptured surface machining. It is found out how feedrate affects the precision of the machining and also tried to study the most suitable feedrate in specific cutting condition. Two eddy current sensors were used for measuring tool deflections of X, Y axis, dynamometer for cutting force and roundness tester for roundness. It was found that the tool deflection is getting better as tool path is going to farther from the center of convex surface. The reason is that the cutting force is increased as the tool approaches to the center. Examining the roundness, cutting force and tool deflection characteristics, it was found that the most suitable feedrate is 90mm/min in convex surface and 120mm/min in concave surface.

Key Words : Cold Die Alloy(냉간금형용 합금강), Tool Deflection(공구변형), Cutting Force(절삭력), Roundness(진원도), Feedrate(이송속도)

1. 서론

자동 CAM프로그래밍 소프트웨어의 개발과 CNC 공작 기계의 발달로 금형 및 항공기부품산업 분야에서 3차원 자유곡면 가공이 많이 사용되고 있다. 이런 자유곡면 가공에 주로 사용되는 공구는 볼엔드밀 공구로 가공정밀도 및 가공

능률을 향상시키기 위하여 공구재료와 절삭날의 형태가 다양한 여러 종류의 볼엔드밀이 개발 제작되어 사용되고 있다. 볼엔드밀을 이용하여 금형 등의 3차원 곡면 형상을 가공함에 있어서 가공물의 정밀도에 영향을 미치는 요소 중에는 절삭력에 의한 공구의 휨이 큰 부분을 차지한다. 그러나 가공물 형상의 복잡성에서 기인되는 정확한 절삭조건 예측

* 경남대학교 기계자동화공학부
(왕덕현 dhwang@kyungnam.ac.kr)

** 경남대학교 대학원 기계공학과

이 곤란하며, 또한 볼엔드밀 가공 공정해석의 부정확성 때문에 절삭력을 고려하여 절삭조건을 부여하지 못하고 대부분 경험에 의존하는 수가 많다.

일반적으로 기계 가공시에는 절삭깊이 등 절삭조건이 변할 때마다 구간별로 공구 이송속도를 지정해 줌으로써 최적의 절삭이 이루어지도록 노력하고 있다. 그러나 가공물의 형상이 복잡해지거나 절삭조건이 매우 까다롭게 변하는 경우 때 구간마다 정밀하게 최적의 공구 이송속도를 지정해주는 것은 불가능하게 된다. 이러한 경우에 가공물에 대하여 가장 안전한 공구 이송속도를 택하는 것이 일반적이나 생산성의 저하를 감수할 수밖에 없다. 가공면의 오차는 절삭가공시 공구와 공작물 사이의 상대적인 처짐에 의한 것으로 평면에 대해서는 직진도 오차, 3차원 공간에서는 평면도 오차, 원주면에서는 진원도 오차와 원통도 오차로 나타낼 수 있다.

볼엔드밀 가공에 대한 연구로서는 Hosoi 등⁽¹⁾은 평면 경사면 절삭날을 갖는 공구와 나선형 절삭날 공구의 상향밀링과 하향밀링에서 나타나는 절삭력을 측정하여 하향밀링이 상향밀링보다 절삭력변화의 폭이 작으며, 특히 나선형 절삭날 공구가 하향밀링에서 절삭력이 비교적 작게 발생한다고 하였다. 미소 절삭날 개념을 통한 절삭력 모델링은 DeVor 등⁽²⁾이 엔드밀에 적용하고 있는데 절삭전 칩의 단면과 실험 계수를 이용하여 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 구하여 전체 절삭력을 산출하는 방법을 제시하였다. 가공면의 오차를 줄이기 위한 연구로는 Moon 등⁽³⁾은 절삭위치의 몇 스텝 전의 위치에서 현재의 가공오차를 예측한 뒤 그 오차를 보상하는 예측 보상제어 기법으로 수치 시뮬레이션을 수행하여 진직도 오차를 개선하려고 하였다. 또한 왕 등⁽⁴⁾은 볼엔드밀 가공시 경사위치각 변화에 따른 공구변형과 형상정밀도에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 이송속도가 가공정밀도에 어떤 영향을 미

치는가를 파악하고 특정 조건에서의 최적 이송속도를 찾아 보기 위하여 현재 금형용으로 많이 사용되고 있는 재료를 사용하였다. 난삭재인 STD11의 냉간금형용 합금강을 피삭재로 사용하고 볼엔드밀 공구로 볼록반구와 오목반구 가공시 이송속도 변화에 따른 절삭력, 공구변형 및 진원도 등을 측정하여 가공특성을 연구하고자 하였다. 이를 위하여 높은 측정 정밀도를 갖는 2개의 와전류센서로 X와 Y축의 공구 변형을 측정하면서 동시에 공구동력계를 이용하여 가공시 절삭력을 취득하여 가공성을 분석하였다.

2. 관련이론

2.1 공구변형

볼엔드밀 공구는 절삭날에 존재하는 절삭날홈(flute)에 의하여 매우 복잡한 형상을 나타내나, 볼엔드밀의 간단한 공구변형 모델은 공구홀더를 강체로서 변형이 일어나지 않는다는 가정에서 공구를 외팔보(cantilever beam)로 간주하여 Fig. 1(a)와 같이 나타낼 수 있다.

Kline⁽⁵⁾은 Fig. 1(b)와 같이 절삭력의 작용점을 공구끝단으로 제한하지 않고 공구 끝에서 어느 위치만큼 떨어진 위치에 존재하는 경우의 공구변형모델로 공구의 끝단에서 z 만큼 떨어진 점 C에 나타나는 수평변형량 $\delta(z)$ 를 식 (1)과 같이 근사적으로 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F}{2ER^4} [(z_F - z)^3 - (L - z)^3] + 3(L - z)^2(L - z_F) \quad (1)$$

여기서, $(z_F - z)^3$ 은 z 의 특성함수이다. 또한 z_F 는 공

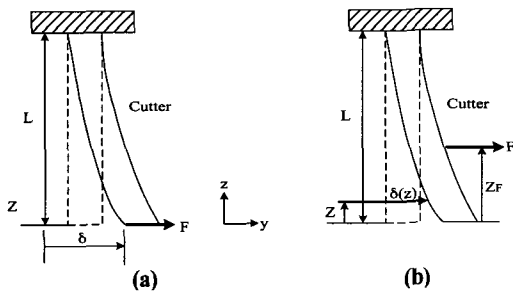


Fig. 1 Simple tool deflection models

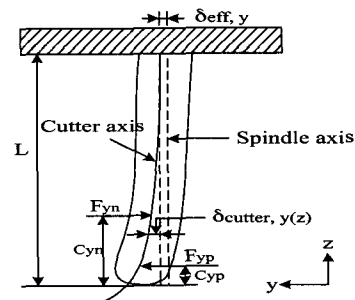


Fig. 2 A deflected ball end mill in the y direction

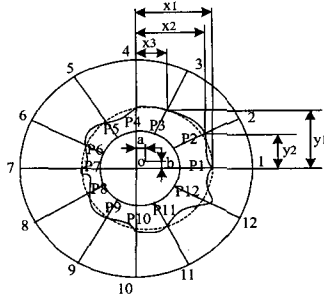


Fig. 3 Least square center method of roundness

구끝단에서 절삭력 F 가 작용하는 점까지의 거리이고, L 은 공구길이이다.

Feng[6]은 Fig. 2와 같이 볼랜드밀의 공구변형모델을 가정하여 볼랜드밀의 절삭계(Cutting system)변형을 완전단일체로 생각하여 그 변형을 고려한 공구변형량을 식 (2)와 같이 구하였다.

$$\delta_y(z) = \delta_{cutter,y}(z) + \delta_{eff,y} \quad (2)$$

여기서, $\delta_{cutter,y}(z)$ 는 z 에서의 y 방향 공구변형을 나타내고 식(1)과 동일하며, $\delta_{eff,y}(z)$ 는 완전단일체의 y 방향 변형량을 나타낸다. 콜렛, 스피들 베어링, 공작기계구조의 완전단일체, $\delta_{eff,y}$ 는 완전단일체의 유효강성으로 식 (3)에 의해서 결정된다. K_{eff} 값은 커터에 하중을 가하여 변형량을 측정하여 얻을 수 있는 값이다.

$$\delta_{eff,y} = (F_{yp} + F_{ym}) / K_{eff} \quad (3)$$

2.2 진원도

원형부분의 기하학적 원으로부터 벗어남의 크기를 진원

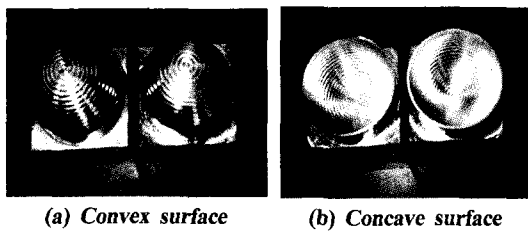


Photo. 1 Sculptured surface machined by machining center

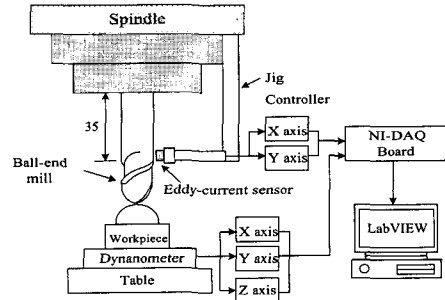


Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

도라고 하며, 2개의 등심의 기하학적 원으로 끼웠을 때 그들 양원이 만드는 영역이 최소가 될 경우의 양원 반지름 차로 표시한다. 진원도 평가 방법에는 최소영역중심(Minimum Zone Center: MZC)법과 최소자승(Least square center: LSC)법이 있는데 본 연구에서는 최소자승법을 적용시켰다.

Fig. 3과 같이 가중심을 지나는 형상을 직각좌표로 잡고, m 등분한 반지름선이 기록도형을 자르는 점의 가로좌표를 x , 세로좌표를 y 로 했을 때, $a = 2\sum x/m$, $b = 2\sum y/m$ 을 가로좌표, 세로좌표로 하는 점이 최소 자승중심이다. 이 점을 중심으로 한 기록도형까지의 반지름을 r 이라 하면, 최소 자승원의 반지름은 $R = \sum r/m$ 으로 주어진다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Fig. 4에 나타난 것처럼 수직형 머시닝센터에 실험장치들을 설치하였으며, 실험에 사용된 실험기기는 Table 1에 나타내었다.

CAM프로그램을 사용하여 모델링한 후 모의가공을 통해서 NC 코드를 생성하여 DNC 모드로 머시닝센터로 전송시켜 Photo. 1과 같이 볼록한 면과 오목한 면을 가공하였다. 또한 곡면을 가공하면서 동시에 공구변형과 절삭력을 와전류센서 2개와 공구동력계를 각각 사용하여 측정하였다.

Table 1 Experimental equipments

Item	Model	Company
Machining center	TNV-40A	Tongil (Korea)
Eddy-current sensor	EX-008	Keyence(Japan)
Controller	EX-502	Keyence(Japan)
Roundness tester	RA-116D	Mitutoyo(Japan)
Dynamometer	SATO	Kyowa(Japan)

와전류센서의 설치는 치구를 제작하여 고정시켰고, 공구 홀더로부터 약 40mm되는 부분에 볼엔드밀 공구의 생크와 1mm정도의 간격이 유지된 상태에서 실험을 하였다. 와전류센서는 Keyence사의 제품으로 센서헤드 및 제어장치는 EX-502인 것을 사용하였으며, 이 제품의 측정범위는 1mm로 본 실험에서는 측정급속이 평면일 때 측정한 결과이므로 볼엔드밀 공구의 생크부와 같은 곡면에서의 정확한 검출값을 알기 위해서 센서보정을 실시하였다. 신호처리는 실험과 동시에 와전류센서에서 제어장치를 거쳐 NI-DAQ보드(NI사, USA)에서 A/D변환되어 PC에 내장되어있는 랩뷰프로그램을 통해서 분석하였다. 공구동력계도 같은 방법으로 함께 신호처리를 하였다.

본 실험에 사용된 절삭조건은 Table 2에 나타내고 있는데, 가공조건중 이송속도 90mm/min은 볼엔드밀 가공시 특성이 양호하다는 추천에 따른 것이다. 실험에 사용된 재료는 STD11이고, 절삭공구는 직경이 10mm인 초경 TiAlN 코팅 볼엔드밀 공구를 사용하였다.

Table 2 Experimental condition for ball end milling

Item	Value
Spindle revolution(rpm)	1000
Feed rate(mm/min)	60, 90, 120
Path interval(mm)	2, 3
Cutting depth(mm)	1.5
Cutting direction	down milling

Fig. 5는 볼엔드밀 공구의 방향과 경로를 볼록한 면에서 나타낸 것이다. 가공은 등고선 방향으로 이루어지며, 볼록한 면일 경우에는 볼엔드밀 공구가 점점 피삭재 중심에서 멀어지고, 반대로 오목한 면은 피삭재의 중심으로 가까워지면서 가공이 된다.

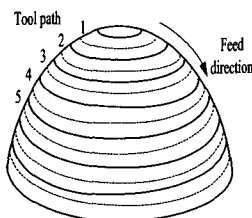


Fig. 5 Measured position of tool path for ball end mill cutter at convex surface

4. 실험결과 및 고찰

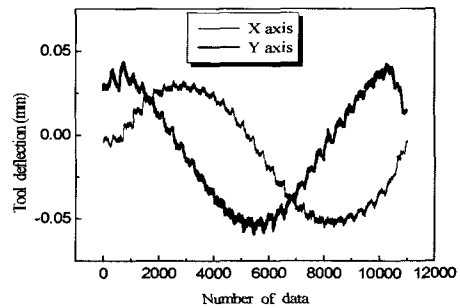
4.1 곡면에서 이송변화에 따른 공구변형

4.1.1 공구변형 프로파일

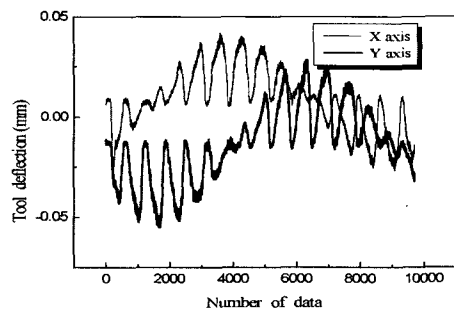
Fig. 6(a)와 6(b)는 회전수 1000rpm이고, 이송속도가 90mm/min로 각각 볼록한 면과 오목한 곡면가공시 공구경로 간격에 따른 공구변형상태를 나타낸 것으로 등고선방향으로 가공할 때 얻어지는 일반적인 공구변형신호이다. 그림에서 알 수 있듯이 공구변형의 주기는 사인파 형태로 나타났으며, X와 Y축의 공구변형은 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 그리고 볼록한 면에서는 공구변형의 주기가 뚜렷한 사인파 형태로 나타났지만, 오목한 면인 경우 공구변형상태의 변화는 볼록한 면에서 측정된 것보다 뚜렷하지 않았다.

4.1.2 공구변형 RMS값

Fig. 6에 나타낸 볼록한 면과 오목한 면에 나타난 프로파일처럼 이송속도와 공구경로에 따라서 측정된 값을 이용하여 실효치전압값(RMS)으로 Fig. 7에 나타내었다. 공구변

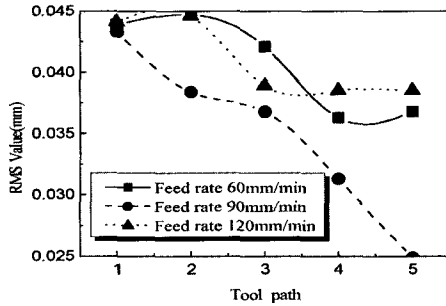


(a) Convex surface

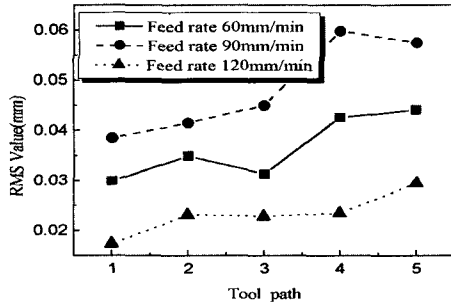


(b) Concave surface

Fig. 6 Tool deflection for tool path



(a) Convex surface



(b) Concave surface

Fig. 7 RMS value of tool deflection for tool path

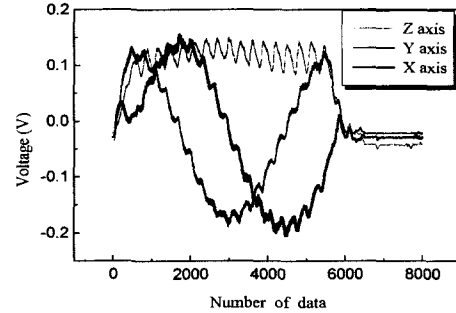
형 측정은 가공이 이루어지면서 블랜드밀 공구 X와 Y축을 동시에 모두 분석하였는데 그 값이 유사한 경향이 나타나 X축만의 공구변형을 나타낸 것으로 Fig. 7(a)와 7(b)는 각각 볼록한 면과 오목한 면의 측정된 공구변형값이다.

볼록한 면인 경우 공구경로 1에서 5로 갈수록 RMS값이 감소하였으며, 오목한 면일 경우에는 오히려 반대의 경향으로 나타났다. 이것은 곡면가공시 볼록한 면일 경우 블랜드밀 공구의 밀부분이 피삭재에 닿는 면적이 가공이 진행됨에 따라 감소하여 공구가 피삭재에 미치는 힘이 미세해지기 때문에 공구변형이 줄어들고, 반대로 오목한 면일 경우에는 가공이 진행됨에 따라 피삭재에 닿는 공구의 면적이 증가하여 큰 힘이 작용함으로써 공구변형이 많이 발생한 것으로 생각된다.

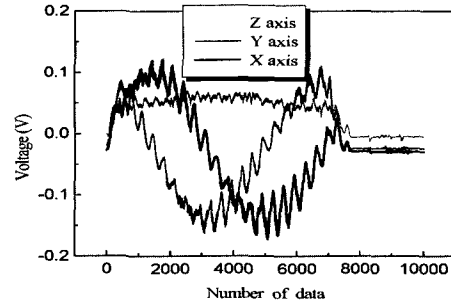
4.2 곡면에서 이송변화에 따른 절삭력

4.2.1 절삭력 프로파일

이송속도 90mm/min의 가공조건에서 곡면가공시 측정된 절삭력을 Fig. 8(a)와 8(b)에 보여주고 있다. X와 Y축방향의 측정된 절삭력 주기는 사인파 형태로 분석되어졌지만, Z



(a) Convex surface



(b) Concave surface

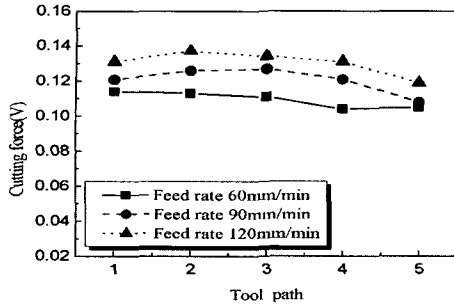
Fig. 8 Typical profiles of cutting force for tool path

축방향인 경우 거의 일직선 형태로 나타남을 볼 수 있다. 그리고 이송속도 60mm/min과 120mm/min에서도 이와 유사한 형태로 나타났다.

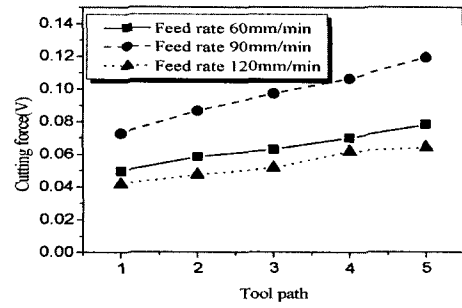
4.2.2 절삭력 측정값

Fig. 8에 나타난 것처럼 이렇게 측정된 값들을 이용하여 Fig. 9(a)부터 9(c)까지 각각 X, Y 및 Z축방향에서 분석된 절삭력을 이송속도와 공구경로에 따라서 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 볼록한 면에서 X축방향에서 측정된 절삭력 변화를 보여주고 있다.

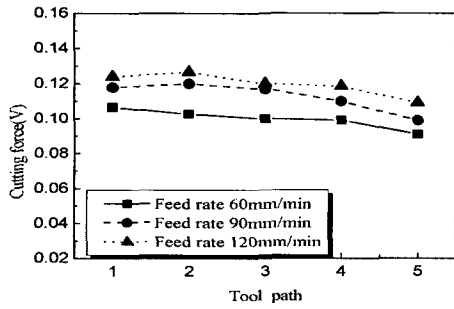
이송속도는 절삭력에 많은 영향을 미치지 않았으며, 공구가 피삭재 중심에서 멀어질수록 절삭력이 줄어든다는 것을 알 수 있었다. 마찬가지로 Fig. 9(b)와 9(c)는 볼록한 면의 Y와 Z축방향에서 측정된 절삭력으로써 이송속도변화에는 큰 영향을 받지 않았지만, 공구경로가 피삭재 중심에서 멀어질수록 절삭력이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 10(a)부터 10(c)까지는 오목한 면에서 각각 X, Y 및 Z축방향에서 분석된 절삭력을 나타낸 것으로 볼록한 면에서 분석된 절삭력과 반대의 경향이 생기는 것을 확인할 수



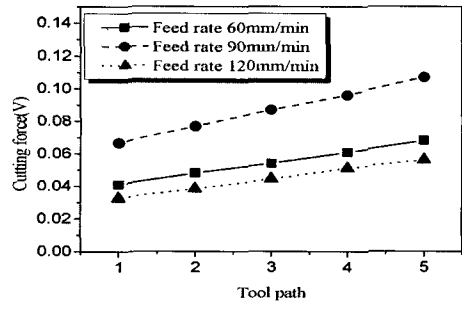
(a) X axis



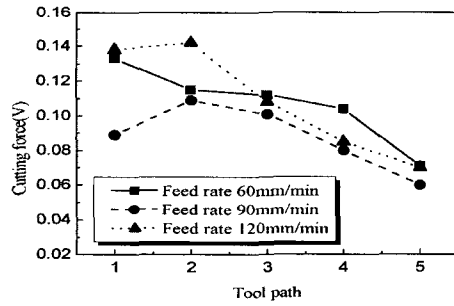
(a) X axis



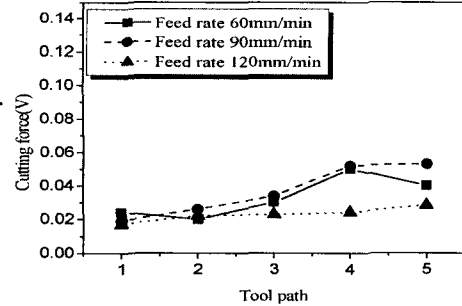
(b) Y axis



(b) Y axis



(c) Z axis



(c) Z axis

Fig. 9 Cutting force for tool path on convex surface

Fig. 10 Cutting force for tool path on concave surface

있었다. 오목한 면인 경우 이송속도 120mm/min에서 측정된 절삭력이 이송속도 60mm/min과 90mm/min에 비해 줄어든 것을 알 수 있었다.

4.3 곡면에서 이송변화에 따른 진원도

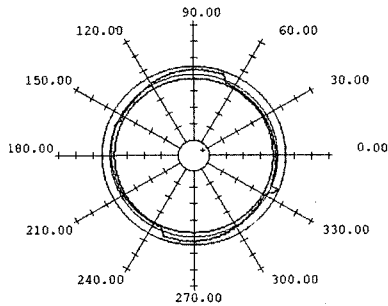
4.3.1 진원도 프로파일

이송속도 변화와 회전수 1000rpm으로 가공한 뒤 공구경로에 따라서 측정된 진원도 프로파일을 Fig. 11(a)와 11(b)

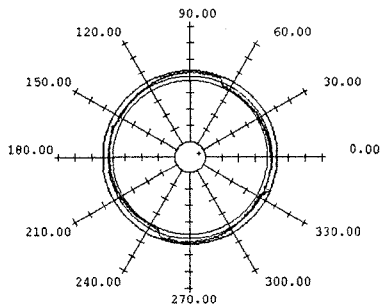
에 나타내었다. Fig. 11(a)는 볼록한 면에서 측정된 프로파일로서 공구경로에 상관없이 비슷한 형상의 타원형으로 분석되었다. 또한 오목한 곡면가공시 나타난 진원도를 Fig. 11(b)에 보여주고 있는데, 볼록한 면에서 측정된 진원도와 마찬가지로 공구경로에 상관없이 타원형을 확인할 수 있었다.

4.3.2 진원도 측정값

이송속도와 공구경로에 의한 볼록한 면에서 분석된 진원



(a) Convex surface



(b) Convex surface

Fig. 11 Typical profiles of roundness for tool path

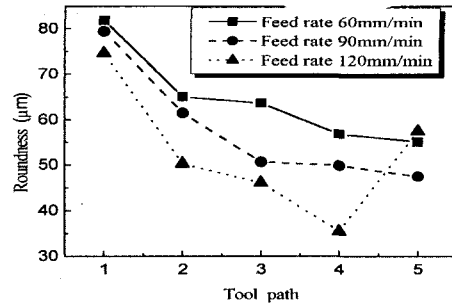
도 측정값을 Fig. 12(a)에 나타내고 있으며, 오목한 면인 경우 진원도 측정값을 Fig. 12(b)에서 보여주고 있다.

볼록한 면의 진원도는 공구경로가 피삭재의 중심으로부터 멀어질수록 좋은 경향을 보이고 있으며, 오목한 면에서는 진원도의 변화가 오히려 볼록한 면의 반대경향으로 나타나는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 볼랜드밀 공구가 공구경로의 과정에서 피삭재 중심에 근접할수록 많은 힘을 받아 진원도에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

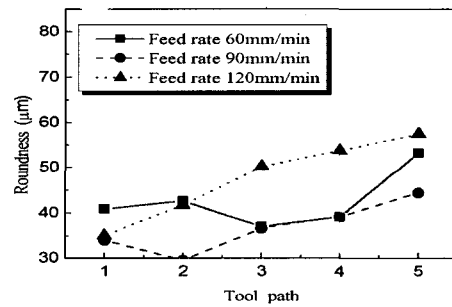
5. 결론

볼랜드밀 공구에 의한 반구가공시 이송속도 변화에 따른 가공정밀도 즉, 공구변형, 진원도, 절삭력의 특성을 파악하기 위해 곡면의 표준형상이라고 할 수 있는 반구면 시험편을 제작하여 실험을 수행하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- (1) 볼록한 면의 공구변형과 진원도는 공구경로가 피삭재의 중심으로부터 멀어질수록 좋은 경향을 보이고 있으며, 오목한 면에서는 공구변형이 볼록한 면의 반대경



(a) Convex surface



(b) Convex surface

Fig. 12 Roundness characteristics for tool path

향으로 나타났다.

- (2) 공구변형값은 볼록한 면에서는 이송속도 90mm/min에서 가장 좋게 나왔으며, 오목한 면에서는 이송속도 120mm/min에서 양호한 결과를 얻었다.
- (3) 진원도에서는 곡면 모두 거의 유사한 타원형 프로파일을 확인할 수 있었는데, 볼록한 면에서는 이송속도 120mm/min에서 가장 좋은 결과를 보였으며, 오목한 면에서는 이송속도 90mm/min에서 가장 좋은 결과를 보였다.
- (4) 볼록한 면에서의 절삭력은 Z축에서 90mm/min에서 가장 좋았으며, 오목한 면에서는 X, Y 및 Z축 모든 영역에서 이송속도 120mm/min에서 가장 양호하였다.
- (5) 이송속도 변화에 따른 가공 형상의 진원도, 절삭력 및 공구변형의 값들을 비교해볼 때 볼록한 면과 오목한 면에서 각각 이송속도 90mm/min과 120mm/min에서 가장 양호한 값을 얻었다.

후 기

이 논문은 1999년도 경남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 씌어진 것임.

참 고 문 헌

- (1) T. Hosoi and Hoshi, "Cutting actions of ball endmill with a spiral edge," *Annals of the CIRP*, Vol. 25, No. 1. pp. 49~59, 1997.
- (2) R. E. DeVor, W. A. Kline, and W. J. Zdeblick, "A Mechanistic Model for the Force System in End Milling with Application to Machining Airframe Structures," *Proc. 8th NAMRC*, pp. 297~303, 1980.
- (3) E. Moon, K. F. Eman, and S. M. Wu, "Simulation Study of Forecasting Compensatory Control of machining straightness," the ASME winter Annals meeting on control of manufacturing processes and robotic systems, Nov., 1983.
- (4) 왕덕현, 박희철, "곡면가공시 경사위치가 변화에 따른 공구변형과 형상정밀도," *한국공작기계학회지*, Vol. 10, No. 4, pp. 55~64, 2001.
- (5) W. A. Kline, R. E. DeVor, and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des.*, Vol. 22, pp. 7~22, 1982.
- (6) H. Y. Feng, C. H. Menq, "A flexible ball end milling system model for cutting force and machining error prediction," *Trans. of ASME J. of Manuf. Sci. and Engr.*, Vol. 118, pp. 461~469, 1996.