

볼엔드밀 가공시 절삭깊이와 가공위치의 변화에 따른 표면정밀도

Surface Precision due to the Change of Cutting Depth and Cutting Location when Ball End Milling

박성은(경남대 대학원), 왕덕현, 김원일, 이윤경(경남대 기계자동화공학부)

S. E. Park(Graduate School, Kyungnam Univ.), D. H. Wang, W. I. Kim, Y. K. Lee(Kyungnam Univ.)

Abstract

Ball end milling process is widely used in the die and mould manufacturing because of suitability for the machining of free form surface. But, as ball end mill is long and thin, it is easily deflected by cutting force. In this study, Cutting force, tool deflection and surface precision was measured according to the change of depth and cutting location. Cutting force was acquired with tool dynamometer and a couple of eddy-current sensor measured tool deflection in x-y direction each. After machining, surface precision was measured with roundness tester and coordination measuring machine for sculptured surface angle change and cutting depth.

Key Words : Die and mould(금형), Tool deflection(공구변형), Eddy-current sensor(와전류 센서), Tool dynamometer(공구동력계)

1. 서론

공작기계의 발달로 고정밀화, 고강성화, 고속화, 지능화가 이루어짐에 따라서 자유곡면 생성에 의한 금형가공 산업이 눈부신 발전을 하고 있으며, 점점 다품종 소량생산형태로 전환되고 있다. 절삭가공이 점점 고정도화 및 고속화되는 추세에 따라 고속 절삭의 속도 한계는 피삭재 재질에 따라 다르며, 고속의 절삭 가공은 최적 상태의 공구재질, 공구형상, 가공조건을 선택한다 해도 피삭재에 따라 가공속도에 차질이 발생한다.

최근에는 보통강을 열처리한 금형강, 티타늄 합금, 내열·내마멸 합금 등 각종 난삭재의 재료가 사용되고 있는데, 고능률 절삭을 위하여서는 주축의 회전수만을 증가시키는 것으로는 불충분하며, 이송속도의 증가도 함께 이루어지는 것이 중요하므로 두 가지를 모두 증가시키는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

볼 엔드밀은 금형가공 산업의 자유곡면 절삭가공에 많이 사용되고 있으며 그 사용이 더욱 확대되고 있다. 그러나, 볼 엔드밀 작업의 절삭조건은 볼 엔드밀링 역학의 복잡성으로 인하여 경험적으로 부여되는 것이 대부분이기 때문에 적절한 가공이 이루어지지 못하여 고정밀의 가공이 어렵다. 또한, 단속적인 절삭과 공구 선단(tool tip)부분이 반구형으로 공구의 강성이 떨어지고 정점부위에서는 가공이 일어나지 않으며, 가공면에 커슥(cusp)이 발생하여 마무리 다듬질을 필요로 한다. 볼 엔드밀 공구는 가늘고 길기 때문에 절삭력에 의하여 쉽게 변형되며 이러한 공구변형은 가공오차를 일으키게 되는 주된 문제점 중에 하나이다. 따라서, 곡면 형상에 따른 적절한 가공조건을 가지지 못하면 가공 중 공구파손, 휨 및 과부하 등의 요인으로 가공물의 표면거칠기, 형상정밀도 저하를 가져오게 된다. 따라서, 볼엔드밀 가공에 관한 연구가 여러 각도에서 활발하게 이루어지고 있으며 공구자체의 형상을 개선하고자 하는 연구와 볼 엔드밀링의 절삭기구 해석을 이용하여 적절한 절삭조건을 부여하고자 하는 연구와 볼 엔드밀의 기하학적 관계와 공구의 휨 등에 의한 가공오차에 관한 연구 등 많은 분야에서 활발하게 수행되어 왔다.

본 연구에서는 볼 엔드밀 공구를 사용하여 자유곡면형상의 피삭재를 그 형상에 맞게 절삭깊이에 따라 상향절삭과 하향절삭으로 가공하고, 가공시 곡면형상의 변화에 따른 절삭력, 공구변형, 및 형상정밀도를 파악하고자 한다. 절삭력은 공구동력계 위에 피삭재를 위치시켜 절삭에 따른 힘의 변화를 가공 중에 취득하고, 공구의 변형은 와전류 센서(Eddy-current sensor)를 직각이 되게 2개를 x, y축에 설치하여 공구변형을 측정한다. 가공 후에는 3차원 측정기를 이용하여 표면 거칠기와 커슌(cusp)을 곡면변화에 따라 형상정밀도를 측정하여 가공형상 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구의 실험장치를 나타내고 있다. 절삭력의 측정은 공구동력계를 머시닝 센터의 베드 위에 설치하고 피삭재를 중심점에 고정하도록 치구를 제작하여 피삭재를 고정시켜 절삭력을 측정하였다. 공구변형의 감지는 센서를 서로 직각이 되게 x와 y축 방향으로 설치하여 동시에 측정하도록 설치하였다. 센서헤드는 공구생크부로부터 1mm 간격을 두었다. 공구동력계와 변위센서로부터 취득된 신호는 A/D 변환되어 계측프로그램인 LabVIEW로 PC에 저장한 후 신호를 분석하였다. Table. 1에 실험에 사용된 실험장치를 나타내었다.

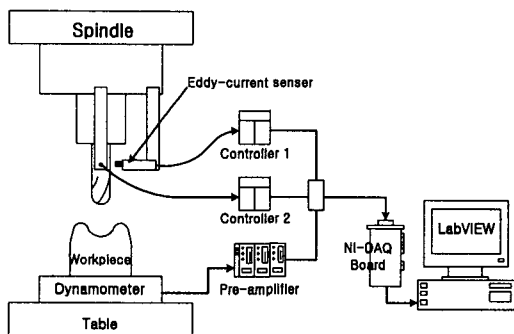


Fig. 1 Diagram of experimental setup

절삭공구는 지름이 14mm이고, 2날인 코팅된 초경 솔리드 볼 엔드밀을 사용하였다. 하이스 엔

드밀에 비하여 본체도 초경 합금으로 제작되기 때문에 공구 강성이 높고 내채터링의 효과가 있어서 뛰어난 정밀도를 얻을 수 있다.

Table. 1 Experimental equipments

Item	Model
Machining center	TNV-40A (Tongil Heavy Ind.)
Tool dynamometer	SATO AST-MM (KYOWA electronic Co.)
Eddy-current sensor	EX-008 (Keyence)
Dynamic strain amplifier	DPM-612A (KYOWA electronic Co.)
A/D converter	AT-MIO-16E-1 (National Instrument)

절삭조건은 주축의 회전수 1100rpm, 이송속도 120mm/min, 경로간격 0.5mm로 고정하고, 절삭깊이를 0.5mm에서 2mm까지 0.5mm씩 변화시켜 수행하였다. 경사면을 가공할 때, 실제적으로는 공구가 공작물을 접하는 점이 경사면에 따라 달라짐으로 절삭속도가 변하게 된다. 피삭재 형상의 가공은 등고선방향가공 형태이고, 상방향절삭으로 상향절삭과 하향절삭으로 가공하였다. Fig. 2는 피삭재를 나타내고 있는데, 가공을 하게 되면 바깥쪽과 안쪽의 절삭방식이 바뀌게 된다. 즉, 바깥쪽에서 상향절삭으로 가공하면 형상의 안쪽은 정점을 기준으로 하향절삭으로 변하게 된다. OMEGA CAM프로그램으로 시편의 형상을 모델링하고, 공구경로 검증과 모의가공을 통해 검증을 한 후 NC코드를 생성하여 머시닝 센터에 전송시켜 실험을 수행하였다.

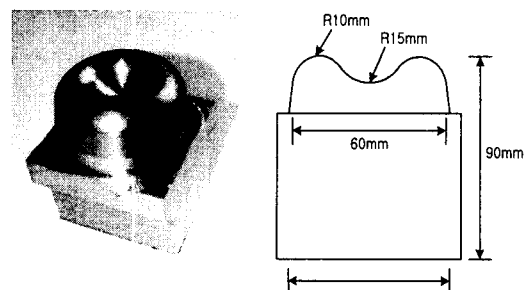


Fig. 2 Cutting workpiece

Fig. 3은 가공시 곡면의 변화에 따른 공구의 위치를 나타내고 있다. 신호의 획득은 -15° 에서 150° 까지 15° 의 간격으로 측정을 하였다.

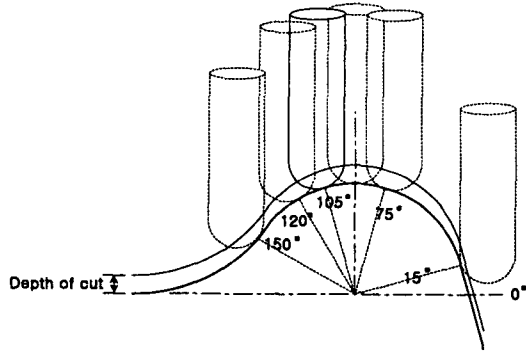


Fig. 3 Tool location on free form surface when ball end milling

실험에 사용된 피삭재는 Cr이 많이 함유된 난삭재인 냉간금형용 합금강(STD11)을 사용하였고, 화학적 성분은 Table. 2에 나타내고 있다.

Table. 2 Chemical composition of STD11

Chemical composition(wt, %)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
1.60	0.40	0.60	0.03	0.03	0.50	13.00	1.20	0.50	0.25

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 볼 엔드밀 가공시 절삭깊이와 가공위치에 따른 절삭력의 변화를 나타내고 있다. 절삭력은 볼 엔드밀 가공시 공구와 공작물의 접촉점에서 수평가로분력(F_x)은 x방향 성분이고, 수평세로분력(F_y)은 F_x 와 90° 를 이루는 y방향 성분이며, F_x 성분과 90° 를 이루면서 주축방향 성분이 수직분력(F_z)이다.

Fig.4는 곡면경사각 변화에 따른 절삭력 성분의 변화를 나타내고 있다. 그림으로부터 상향적삭과 하향적삭의 절삭력 변화는 대체적으로 일치하고 있다. 하향적삭이 대체적으로 상향적삭보다

절삭력이 적게 나타났다. 105° 에서 값이 증가하였다가 다시 감소하는데 이것은 볼 엔드밀의 특

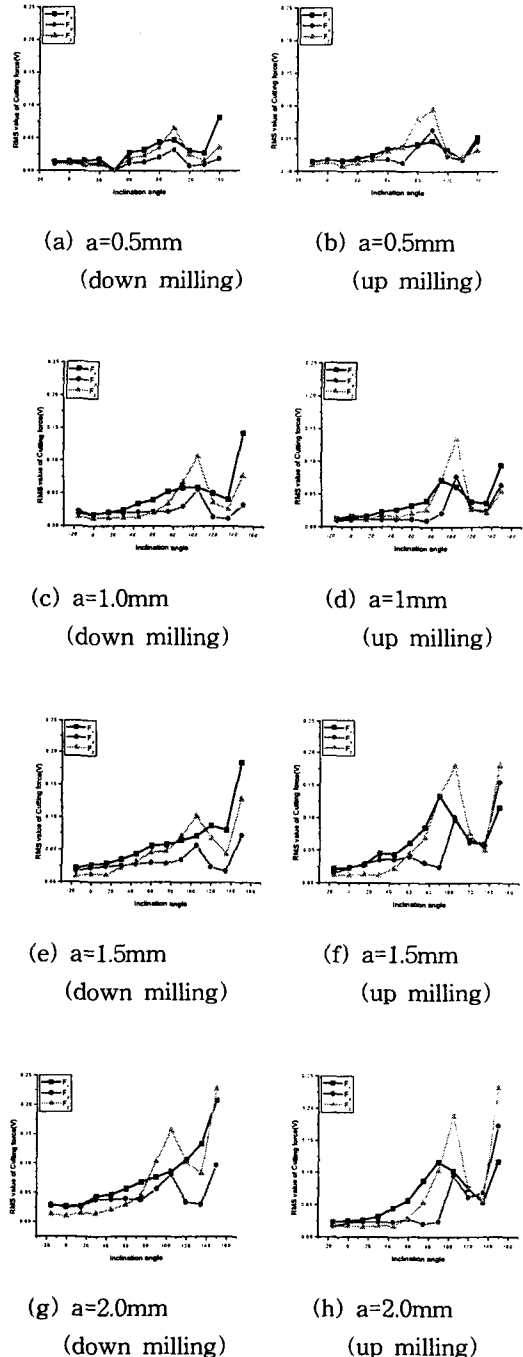
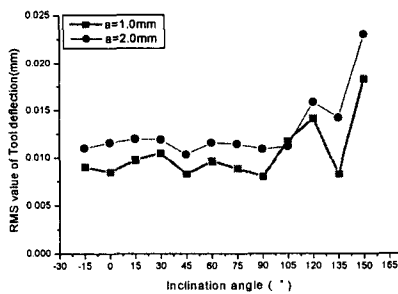
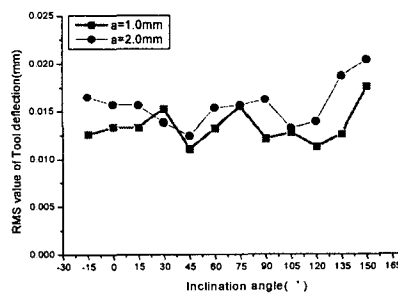


Fig. 4 Cutting force due to the change cutting depth and cutting location

정상 날의 정점부근에서 절삭이 일어나지 않으며, 상방향가공에서 하방향가공으로 바뀌면서 절삭성 저하로 절삭력이 증가하는 것 같다. -15° 에서 90° 까지는 볼 엔드밀의 옆날에 의해 절삭이 되기 때문에 절삭성이 좋지만, 90° 부터는 볼 엔드밀의 옆날과 밑부분이 같이 절삭하기 때문에 절삭성이 감소한다. 그리고, 90° 보다 105° 에서 절삭력이 더 큰 이유는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 절삭이 되는 칩의 양이 90° 을 기준으로 하방향가공으로 바뀌면서 증가한다. 120° 부터는 다시 절삭량이 감소하였다가 150° 부터는 다시 증가하게 되는데 Fig. 4의 곡선과 일치하는 것을 알 수 있다. 절삭깊이가 곡면의 접선에 수직하게 되는 것이 아니라 단지 Z축에 수직하게 작용하기 때문에 곡면의 옆부분에는 실제 절삭깊이보다 작게 되어 가공시 제거되는 양이 적어지게 되어 절삭력이 작게 작용하는 것으로 생각된다.



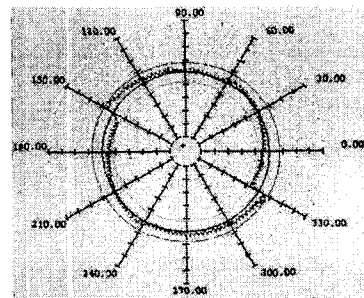
(a) down milling



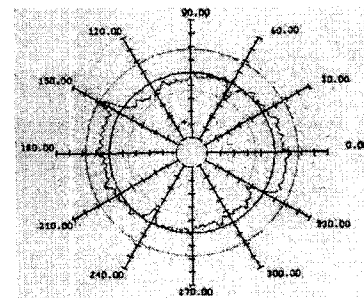
(b) up milling

Fig. 5 Tool deflection due to the change cutting depth and cutting location

Fig. 5는 곡면 경사각 변화에 따른 공구변형을 비교하였다. 절삭깊이에 따른 공구변형의 차이는 뚜렷이 나타난다. Fig. 5(a)는 하향절삭시 공구변형으로 절삭력 변화와 비슷한 경향이 나타나지만 절삭력은 105° 에서 절삭력이 증가하다 감소하지만 공구변형은 120° 에서 증가하였다가 다시 150° 에서 다시 증가를 하고 있다. Fig. 5(b)는 상향절삭으로 하향절삭시 공구변형 곡선과는 일치성은 없으며, 하향절삭에서처럼 150° 에서 공구변형이 최대로 증가한다. 절삭력이 105° 까지 일정하게 증가하는 데 비해, 공구의 변형이 105° 까지 뚜렷한 변화를 보이지 않는 것은 75° 부터는 공구경로가 거의 평면에 가까워져 x축 방향과 y축 방향으로 받는 절삭력보다 z축 방향으로의 절삭력이 커서 세가지의 합력힘이 감소되거나 일정한 형태의 공구변형이 일어나지 않는 것으로 생각된다.



(a) Roundness profile at 0°



(b) Roundness profile at 150°

Fig. 6 Roundness result

Fig. 6은 곡면의 0°와 150°에서의 진원도를 나타내었다. 0°에서의 진원도 윤곽은 채터링으로 인한 결과가 아닌가 생각된다. 경사면 절삭에서 절삭깊이가 작을 때 채터가 발생하기 쉬운데, 가공 중 떨림현상으로 여겨지는 소리가 발생하였다. 큰 절삭력이 작용하는 150°에서의 진원도 값은 0° 및 다른 각도의 진원도 값보다 큰 값을 가졌다.

4. 결론

본 연구에서는 볼 엔드밀로 곡면가공시 공작물과 접촉하는 공구의 접촉 경사각 변화에 따른 절삭력 특성, 공구변형 특성 및 형상정밀도를 절삭깊이를 변화시켜 얻은 데이터를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭력은 가공깊이가 증가함에 따라 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 상향절삭보다는 하향절삭에서 절삭력이 적게 나타났다. 곡면에 따른 절삭력은 105°와 150°에서 크게 증가하였다.
3. 공구의 변형은 하향절삭가공시 하향절삭범위까지는 적은 값을 보였지만 상향절삭으로 바뀌는 지점부터는 상향절삭가공시 보다 더 큰 변형을 보였다. 하향절삭과 상향절삭의 공통점은 없었으며, 큰 절삭력이 일어나는 150°에서 큰 변형을 일으켰다.
4. 진원도는 곡면의 0°에서는 채터링으로 보이는 형상을 보였으며, 150°에서는 큰 절삭력의 작용으로 진원도 값이 크게 나타났다.

참고문헌

- [1] 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, "CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공", 회중당, pp. 334~358, 1996.
- [2] B. K. CHoi and R. B. Jerard, "Sculptured Surface machining", Kluwer Academic Publishers, pp. 53~115, 1998.

- [3] 윤중학, 이종원, 정기영, 정문섭, "머시닝센터에서 볼 엔드밀가공으로 고능률, 고정밀도 제조를 위한 표면가공 조건", 한국공작기계학회지, 제 7권, 제 3호, pp. 99~103, 1998.
- [4] Y. Altintas, P. Lee, "Mechanics and Dynamics of Ball End Milling", Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME, Vol. 120, No. 4, PP. 684~692, 1998.
- [5] H. Y. Feng, C. H. Menq, "A Flexible Ball End Milling system Model for Cutting Force and Machining Error Prediction", Trans ASME J. Manuf. Technol. 61, pp. 61~60, 1993.
- [6] W. A. Lim, K. S. Feng, C. K. Menq, "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. Tool Manufact. Vol. 35, No. 8, pp. 1149~1169, 1995.
- [7] R. S. Lin and Y. Koren, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces", Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME, Vol. 118, No. 1, pp. 20~28, 1996.