

엔드밀 작업에서 공구의 열변형에 관한 연구

홍민성*

A Study on the Thermal Deformation of a Cutting Tool in End Milling

Min Sung Hong*

Abstract

Machining process introduces thermal deformation of a cutter, which affects the surface finish of the workpieces. By measuring the temperature distribution of the cutter, thermal stress and deformation of the cutter are simulated. In addition, surface roughness of workpiece is simulated by the surface-shaping system. The result shows that thermal deformation deteriorates the surface roughness.

Key Words : Thermal deformation(열변형), Surface-shaping system(표면 가공시스템)

1. 서론

일반적으로 CNC 밀링 가공시 가공물의 질을 좌우하는 표면 거칠기는 가공 조건, 즉 절삭 속도와 이송 속도에 의해 크게 결정된다. 표면 거칠기에 영향을 미치는 주 요인으로는 정적 특성과 동적 특성, 그리고 열적 특성으로 생각할 수 있다.

1983년 CIRP Meeting에서 Taniguchi는 가공 정밀도를 보통, 정밀, 초정밀의 세 가지로 나누어 1900년과 2000년 사이에 변천하는 과정을 정리하였다.⁽¹⁾

또한 공작기계의 동적 특성에 대해서는 주로 진동 문제에 대한 연구가 행해졌는데, 1960년대부터 활발히 진행되어 많은 이론 논문과 실험 방법 및 결과가 발표되었다.⁽²⁾

가공 정밀도에 대한 요구가 점점 더 커짐에 따라 지난 40년간 열적 거동에 관한 연구 또한 활발히 진행되어왔다. 그렇지만 일반적으로 적용하여 만족할 만한 열적 불안정의 해결책은 나오지 않고 있으며 단지 여러 가지 기계 구성요소, 즉 스펀들, 컬럼, 베드와 같은 본체 구조나 테이블, 슬라이드에 대해 열적 최적화를 얻으려는 연구⁽³⁾가 주를 이루었다. 최근에는 컴퓨터 기술의 진보와 더불어 기계 구성요소내의 온도 분포와 그것에 따르는 열변형의 계산이 유한 요소법(Finite Element Method)⁽⁴⁾이나 수치 계산법에 의해 가능해졌다.

또한, 연속 절삭인 선반 작업에서의 공구에 대해서는 많은 연구가 행해졌지만, 단속 절삭인 밀링 작업에서 공구의 열적 특성에 대한 연구는 활발히 이루어지지 않고 있는 실정이다.

* 아주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

따라서 본 논문에서는 밀링 절삭시 발생하는 공구의 온도와 이에 따른 공구의 열변형에 대해 연구하였다. 절삭 가공에서 발생하는 열은 고속 절삭 과정에서 공구와 공작물에 영향을 미치는데, 절삭시 발생하는 절삭열은 공작물, 공작기계의 열팽창, 공구변형 등의 원인이 된다. 이러한 절삭열은 절삭유를 사용하여 공구와 공작물의 온도를 저하시킬 수 있다. 그러나 절삭유를 사용하는 경우 경제적인 문제와 사용 후 처리시 환경 오염 등의 문제가 발생한다.

그러나 열적 영향으로 인한 표면 거칠기를 안정시키는 완전한 해결책은 아직 발견하지 못하고 있다. 그 이유는 공작기계 자체, 공구와 가공물, 기계와 주위환경사이에 복잡한 열적 상호 작용이 존재하기 때문이다.

본 연구에서는 밀링 작업시 발생하는 온도를 비접촉 온도계로 측정하여, 측정된 온도를 이용하여 수치해석을 통한 공구의 온도 분포와 열변형을 해석하였으며, 이로 인한 가공물 표면에 발생하는 오차를 표면가공법을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

단속 절삭인 엔드밀링 작업은 연속 절삭의 선반 작업에 비해 절삭점 부근에서 복잡한 온도 분포를 갖고 있어서, 온도 측정에 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 회전하는 밀링 커터의 온도를 측정하기 위해서 비접촉식 온도계(OPL-7)를 사용하였다. 비접촉식 온도계의 측정원리는 절대온도 이상의 모든 물체가 그 온도에 상응하는 적외선 에너지를 외부의 모든 방향으로 방출하는데, 이 에너지를 이용하여 열전대에 집광하여 전기신호로 변환한 후 마이크로컴퓨터로 필요한 연산처리를 하여 액정 화면에 온도로 표시해준다.

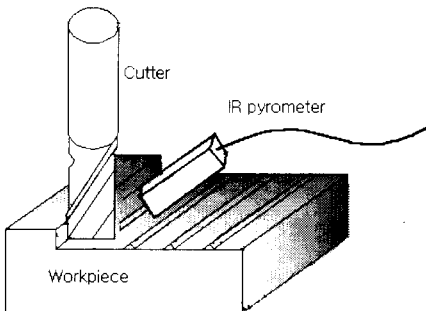


Fig. 1 Experiment to measure temperature in the end milling process

Table 1 Material properties of tool

Young's Modulus	54000kg/mm ²
Poisson's Ratio	0.26
Mass Density	14000kg/m ³
Coefficient of Thermal Expansion	5.1 × 10 ⁻⁶ /°C
Thermal Conductivity	75.36 W/(m · K)
Reference Temperature	17°C

Table 2 Cutting Conditions

Number of Flutes	2
Tool Diameter(mm)	6.0
Depth of Cut(mm)	1.0
Feedrate(mm/min)	200
Spindle Speed(rpm)	800

공구의 절삭 온도 측정 방법은 Fig. 1과 같고, 절삭 속도와 이송속도는 각각 800rpm, 200mm/min이며 1mm의 절삭깊이를 갖는다. 비접촉식 온도계는 공구 끝단에서 160mm 떨어진 위치에 두고 측정하였으며 이때, 비접촉식 온도계의 측정부위(spot)는 ø 1.5mm의 값을 가진다.

본 연구에서 사용한 공구는 ø6mm인 엔드밀이고, 공작물로는 SKT-4 열간 금형용 합금강을 사용하였다. 공구의 물성치와 가공조건은 Table 1과 Table 2에서 보여준다.

절삭작업이 정상 상태에 도달한 후 비접촉 온도계를 이용하여 엔드밀의 절삭온도를 10회 측정한 결과 공구 끝단에서 최대 온도가 측정되었다. 측정된 온도들의 평균값은 500°C이다.

3. FEM 해석

실험을 통하여 측정된 공구의 온도를 이용하여 공구의 온도 분포와 열변형을 해석하였다.⁽⁵⁾ 이를 위해서 Fig. 2와 같이 엔드밀의 형상을 모델링하였다.

경계조건으로 홀더에 고정되는 생크(shank)의 단면적을 모든 방향에 대해 구속하였고 공구 끝단에 온도 500°C를 주어 유한 요소 모델을 온도장으로 해석한 결과는 Fig. 3에서 보여준다.

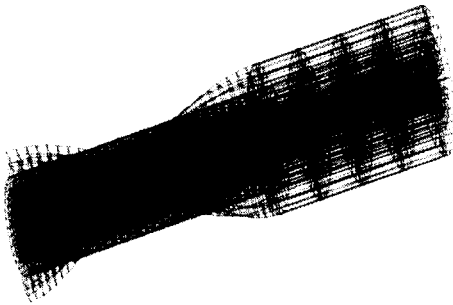


Fig. 2 FEM model of the endmill

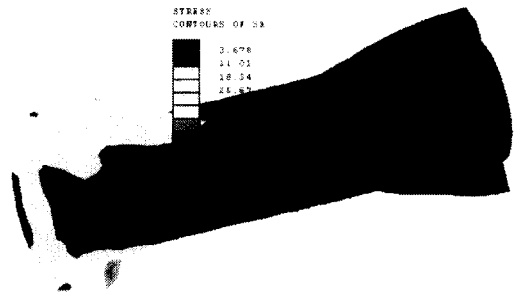


Fig. 5 Thermal stresses by the FEM

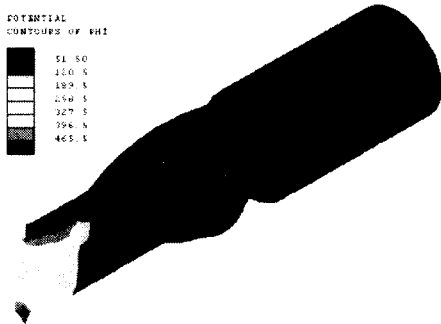


Fig. 3 Temperature distribution of the endmill

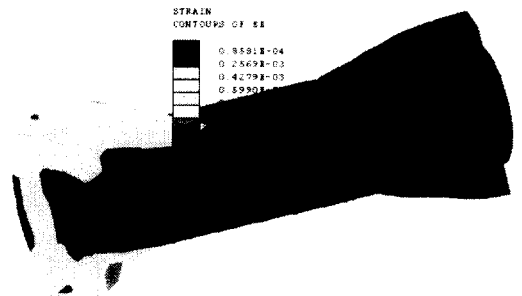


Fig. 6 Thermal strains by the FEM

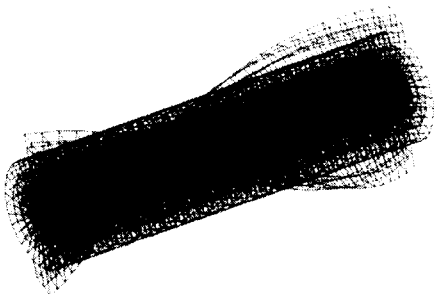


Fig. 4 Simplified FEM model of the endmill

온도 분포 해석 결과에서 절삭이 일어나지 않는 부분에서 큰 변화가 없고 일정함을 보이는 것은 대기 중으로 열 방출이 일어나기 때문이다. FEM 해석 수행시 이러한 대기 중으로의 열 방출을 고려하였다.

위의 온도 분포를 결과로 열응력과 열변형을 해석하였다. 생크부분에서는 거의 온도 분포가 일정하기 때문에 열

응력과 열변형 해석은 모델링을 단순화하고 해석의 용이성을 위해서 생크부분을 제외하고 해석하였다. 엔드밀의 유한 요소 모델은 Fig. 4에서 보여준다.

Fig. 4의 유한 요소 모델을 바탕으로 열응력을 해석한 결과 최고 응력값이 503N/mm^2 으로 나타났다. 열응력과 열변형 해석 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에서 각각 보여주고 있다.

따라서, 최대 변형량 값은 최대 열응력에서 일어나며 공구 반경 방향으로 $0.6338 \times 10^{-3}\text{mm}$ 의 값을 가진다.

4. 표면 가공 시스템

표면 가공시스템(surface-shaping system)은 머신 공구의 기구학과 절삭공구와 공작물의 형상을 포함하고 가공된 표면의 조도를 예측하기 위한 공구와 공작물 사이의 표면 형상을 정의하는 점들간의 관계를 유도하는 시스템 모델을 표현하는데 쓰인다.⁽⁶⁾

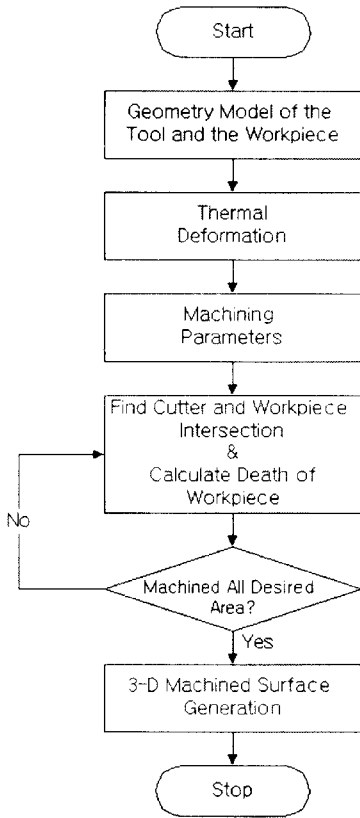


Fig. 7 Flowchart of the surface-shaping system

표면가공 시스템은 공작기계의 기본 움직임뿐만 아니라 가공 중에 발생하는 에러, 공구의 런아웃, 그리고 특수 목적용 고차원 운동을 포함한다.

표면가공을 위한 시뮬레이션의 방법은 Fig. 7과 같다.

5. 시뮬레이션 결과

FEM 해석으로부터의 공구의 열변형량을 바탕으로 표면 가공 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다.

Fig. 8에서 이상적인 가공조건에서의 가공 표면을 보여 주고 있다. Fig. 9는 공구 반경 방향으로 열변형이 일어났을 때의 가공 표면을 나타내고 있다.

Fig. 9에서 열변형에 의한 표면 거칠기 저하를 볼 수 있다. 열변형이 일어나지 않은 경우인 Fig. 8에서의 표면 거칠기 S_q 는 $1.207\mu\text{m}$ 이고, 열변형이 일어난 경우인 Fig. 9에

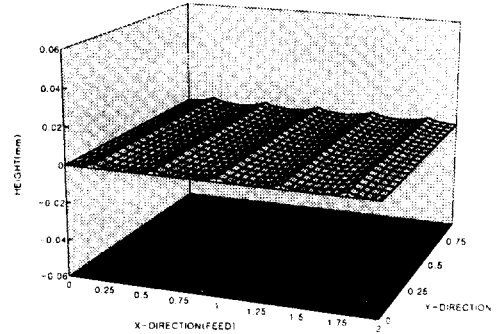


Fig. 8 Idealized surface by surface-shaping system

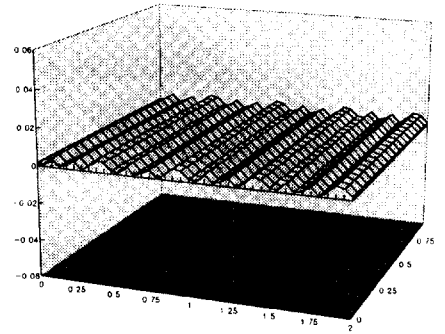


Fig. 9 Simulated surface by the thermal deformation

서의 표면 거칠기 S_q 는 $3.236\mu\text{m}$ 으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서 유한 요소 해석 방법을 이용하여 공구의 온도 분포와 열응력 및 열변형을 해석한 후, 표면 가공 시스템을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구와 공작물 인터페이스 부분에서 절삭열이 집중됨을 알 수 있다.
- (2) 가공 표면 시뮬레이션 결과 열변형으로 인해 표면 거칠기가 2배 이상 저하하였음을 알 수 있다.

가공조건과 공구와 공작물재질에 따른 절삭 온도에 따른 열변형량의 변화를 데이터베이스화하여 표면가공 시스템을 적용하면 열변형에 의한 표면 거칠기를 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Taniguchi N., "Current Status in and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing", *Annals of the CIRP*, Vol.32/2, pp.573~582, 1983.
- (2) Weck M., *Handbook of Machine Tools*, Vol. 4, John Wiley & Sons, 1984.
- (3) 양승환, "수평 머시닝 센터의 준 정적 오차의 실시간 보정", *한국정밀공학회지*, 제 14권 11호, pp.154~162, 1997.
- (4) Sata T., "Analysis of thermal deformation of machine tool by the Finite Element Method", *Annals of the CIRP* 21, 1972.
- (5) LUSAS Element Library, FEA LTD.
- (6) Hong M. S. and Ehmann K. F., "Generation of Engineered Surfaces by the Surface-Shaping System", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 9, pp.1269~1290, 1995.
- (7) Boothroyd G. and Knight W., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker Inc., New York, 1989.
- (8) Lin J., "Inverse Estimation of the Tool-Work Interface Temperature in End Milling", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No. 5, pp.751~760, 1995.