

고속 엔드밀 가공시 가속도계를 이용한 표면형상 시뮬레이션 Simulation of surface profile using accelerometer in high speed end milling

이기용*(부산대 대학원), 강명창, 이득우, 김정석(부산대 기계공학부)
Ki-Yong Lee (Graduate School, Pusan Nation Univ.), Myeong-Chang Kang, Deuk-Woo Lee,
Jeong-Suk Kim (School of Mechanical Engineering Pusan Nation Univ.)

Abstract

To obtain precise surface and high productivity, high speed end milling has been studied recently. Though high speed end milling is explicitly effective for precision surface generation geometrically, tool deflection, chatter vibration and frequency characteristics of end milling system deteriorate the theoretical surface. In this study, simulation algorithm and programming method are suggested to simulate machined surface using acceleration signal in high speed end milling. This simulation is conducted by considering vibrational effect of spindle system which was not considered by other researchers. Between simulated results and experiment results, good agreements were obtained.

Key Words : High speed end milling(고속엔드밀가공), Acceleration signal(가속도 신호), Vibrational effect(진동효과), Simulation(시뮬레이션)

1. 서론

최근 생산성 및 정밀도를 향상시킬수 있는 고속가공에 관한 관심이 고조됨에 따라 고속가공 표면의 형성 기구에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾

기하학적으로 절삭표면에 영향을 미치는 요인

은 절삭속도, 날당 이송량, 셋팅 오차 등이 있는데 실제 절삭시 형성되는 표면은 칩핑, 진동 등에 의해 표면이 더 악화되는 경우가 대부분이다. 특히 고속 절삭시 주축의 고속화로 인한 진동 야기는 표면 거칠기를 수배 악화시키는 요인이 될 수 있다.

이러한 진동을 예측하고 절삭조건을 적절히 선정하려는 연구도 활발히 진행되고 있다. 이때 주축의 동특성 평가가 수행되는데 이러한 연구는 절삭의 불안정영역을 미리 파악하여 대처하는 방법은 될 수 있으나 실제 절삭시는 다양한 외적 요인에 의해 예기치 못한 진동이 발생하는 경우가 많으므로 절삭 중의 진동 신호를 측정할 필요가 있다.⁽²⁻⁵⁾

따라서 본연구에서는 실제 절삭 중의 가속도 신호를 측정하여 이를 통해 표면형상을 시뮬레이션 하고자 한다. 시뮬레이션 모델은 기존의 강체 및 유연성 모델에 근거하여 수립하였고 주축의 동특성을 고려한 동적모델과 병행하여 가속도 신호의 주파수 분석 결과를 표면형상 시뮬레이션에 이용할수 있도록 새로운 방법을 제시하였다.

2. 시뮬레이션 모델

표면형상을 시뮬레이션 하기 위해 강체, 유연성, 동적모델을 병합한 모델과 가속도 신호를 이용한 시뮬레이션 모델을 Fig. 1과 같이 구성하였다.

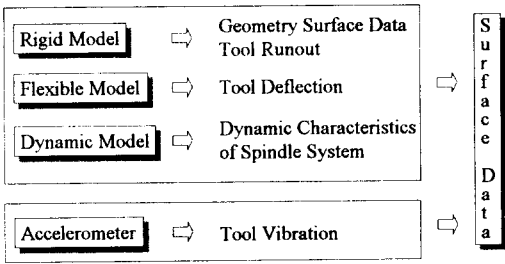


Fig. 1 Block diagram of simulation model

강체모델에서는 공구설치시 발생하는 런아웃을 고려하여 기하학적으로 생성되는 표면데이터를 확보하며 유연성모델에서는 집중하중에 의한 공구처짐을 해석한다. 동적모델에서는 주축계의 동특성을 해석하여 공진 주파수 영역을 파악하고 이를 이용하여 2자유도계 진동 모델을 구성한다.⁽⁶⁾

이러한 통합모델은 가공전에 표면형상을 예측할 수 있는 장점이 있지만 실제 가공시 발생하는 진동에 의한 표면 형상을 구현하기는 어려우며 이를 보완하기 위해 가공중 발생하는 가속도 신호를 이용하여 표면 형상을 시뮬레이션하는 기법이 요구된다.

가속도 신호를 시뮬레이션에 이용하는 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

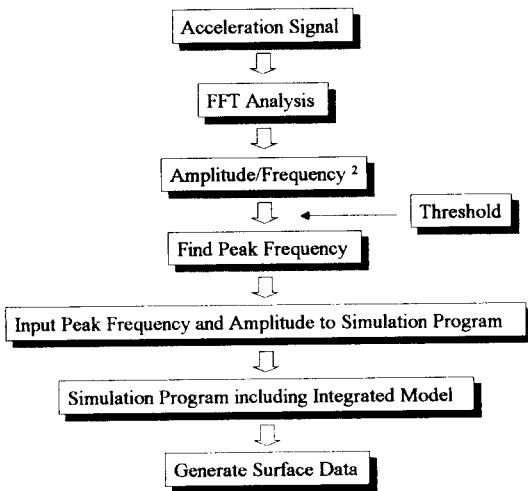


Fig. 2 Flowchart of simulation process using acceleration signal

가속도 신호의 주파수 분석 후 실제 시뮬레이션에 이용되는 값은 진동 변위이므로 주파수²으로 나눈 진폭값을 사용한다. 이때 모든 피크 주파수에 대한 시뮬레이션을 할 수 없으므로 진폭에 대해 적절한 설정치를 선정하여 그 이상의 피크 주파수만을 시뮬레이션 프로그램⁽⁶⁾에 입력한다.

가속도 신호는 식(1)을 통해 프로그램에 입력된다.

Vibration term =

$$\text{Amplitude} \cdot \sin\left(\frac{60 \cdot j \cdot \text{Frequency} \cdot 2\pi}{\text{Total } j \text{ number} \cdot \text{rpm}}\right) \quad (1)$$

여기서, j : 회전각의 증가에 따른 이산값

Total j number : 1회전당 j의 개수(3600으로 이산화)

3. 실험장치 및 방법

본 실험은 고속 머시닝 센터(MAKINO V-55)에서 수행하였고, 공구는 초경엔드밀, 공작물은 금형강(STD11)을 사용하였다. 가속도계는 Fig. 3과 같이 주축에 고정하였으며 측정된 신호는 증폭기를 거쳐 PC로 저장된다.

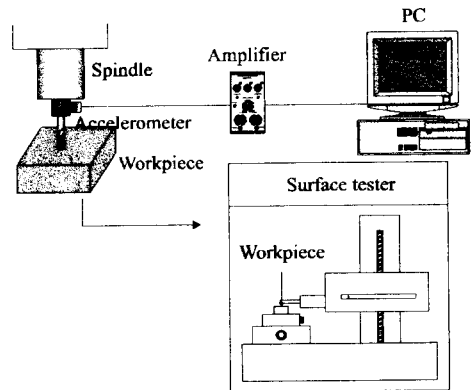


Fig. 3 Experimental setup for measuring acceleration signal

실험은 엔드밀 측면 가공으로 수행하였으며 가속도계는 이송의 수직방향(Y방향)에 장착하여 신호를 측정하였다. 표면 거칠기에 직접적 영향을 미치는 진동은 Y방향으로 생각되며 이송방향(X방향)의 진동은 표면거칠기보다는 3차원 표면형상에 변화를 줄 것이다.⁽⁶⁾

실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Cutting conditions

Spindle revolution (rpm)	Feed per tooth (mm/tooth)	Radial depth (mm)	Axial depth (mm)	Cutting fluids
10,000	0.05	0.1~0.5	10	Dry

4. 실험결과 및 고찰

시뮬레이션을 위해 가공전에 공구의 런아웃을 측정하고 결과 오프셋이 $3\mu\text{m}$, 오프셋각은 65° 있다. 오프셋이 $3\mu\text{m}$ 일 경우 표면에는 날당 이송량에 의한 피크는 보이지 않으며 회전당 이송량이 주기가 되는 파형이 나타난다. Fig. 4는 시뮬레이션을 통해 형성된 표면형상이다.

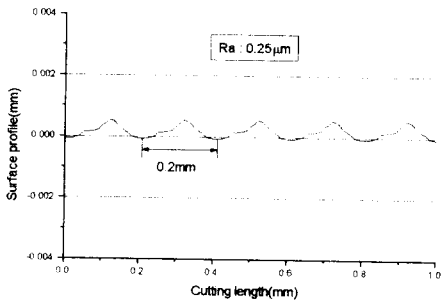


Fig. 4 Surface profile using simulation (Offset= $3\mu\text{m}$, Offset angle= 65°)

이러한 결과는 실험결과와도 일치하는데 Fig. 5는 반경방향 절입이 0.1mm 인 경우의 표면 형상이다.

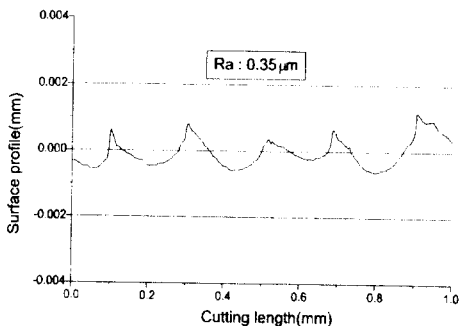


Fig. 5 Surface profile measured from experiment (Radial depth = 0.1mm)

Fig. 5에서 시뮬레이션 표면형상과는 달리 파형이 약간 일그러진 형태로 나타나는데 이는 시뮬레이션에서 고려하지 못한 칩핑 등 불규칙적 요인에 의한 것으로 표면거칠기 값을 $0.1\mu\text{m}$ 정도 악화시키는 원인이 된다.

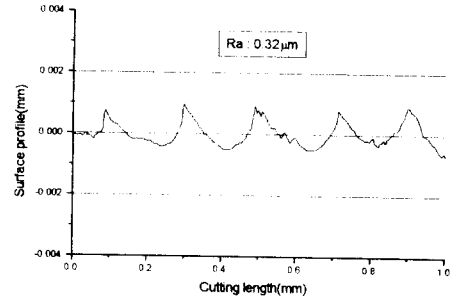


Fig. 6 Surface profile measured from experiment (Radial depth = 0.3mm)

Fig. 6은 반경방향 절입 0.3mm 인 경우의 표면 형상이다. 파형의 형태는 시뮬레이션 결과와 유사하며 거칠기 값에서 Fig. 5와 같은 요인에 의해 오차를 보이고 있다. 이때 측정된 가속도 신호를 주파수 분석하면 Fig. 7과 같으며 이를 시뮬레이션에 이용하기 위해 진폭을 주파수²으로 나눈 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 이때 사용한 창함수는 해닝창(Hanning window)이다.

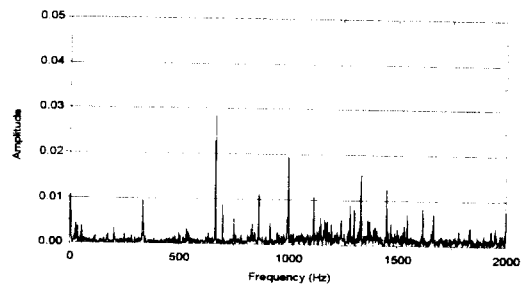


Fig. 7 FFT analysis of acceleration signal

Fig. 7의 진폭값은 단위가 mV 이며 전하증폭기에서 $10\text{mV}/\text{ms}^2$ 으로 증폭된 값이다. 그러나 시뮬레이션에 이용되는 값은 Fig. 8의 변환된 그래프를 이용하며 더욱 기준주파수($332, 667\text{Hz}$)에 대한 비로서 나타내기 때문에 큰 의미는 들수 없다.

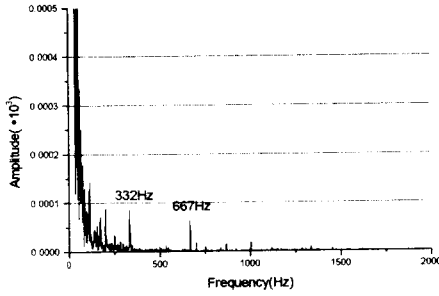


Fig. 8 Converted results of FFT Analysis (Amplitude/Frequency²)

Fig. 8로부터 250Hz이하의 저주파 구간은 노이즈 등의 영향으로 시뮬레이션에 이용하기가 어려우며 또한 실제 테스트 결과 표면에 영향을 미치는 주파수는 고주파 영역으로 분석된다. 이러한 분석은 반경방향 절입 0.2mm로 가공하였을 경우의 가속도 신호의 주파수 분석 Fig. 9와 이를 이용한 시뮬레이션 결과로부터 확인할 수 있다.

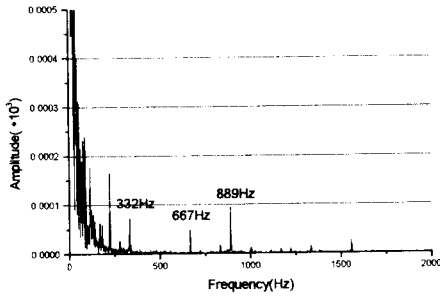


Fig. 9 Converted results of FFT Analysis (Radial depth=0.2mm)

Fig. 9로부터 특이한 피크 주파수가 889Hz에서 나타남을 볼 수 있다. 이는 회전주파수 166.7Hz의 조화성분인 332Hz와 667Hz에 비해 진폭값이 큰 고주파 성분으로 표면파형을 변화시키며 거칠기 값에도 큰 영향을 미치게 된다.

이 때 진폭값을 667Hz에 대한 상대적 비로 나타내면 332Hz : 667Hz : 889Hz = 1.5 : 1 : 1.95로 되며 이 값이 시뮬레이션 프로그램에 입력된다.

Fig. 10은 고주파 피크가 나타난 경우(반경방향 절입 0.2mm)의 표면 파형으로 거칠기 값이 다른

경우에 비해 4배 정도 크게 나타난다.

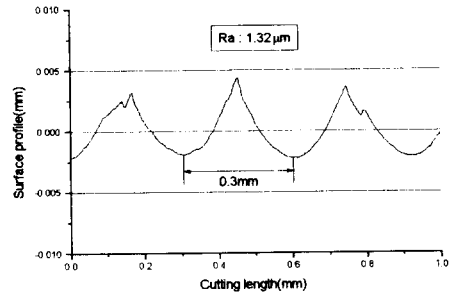


Fig. 10 Surface profile measured from experiment (Radial depth = 0.2mm)

Fig. 10에서 거칠기 값이 클 뿐만 아니라 표면 파형의 주기도 0.3mm로 회전당 이송량의 1.5배에 달한다. 이러한 현상은 가공시 진동에 의한 영향으로 고주파 진동 성분에 의한 표면 형상 변화로 설명할 수 있다.

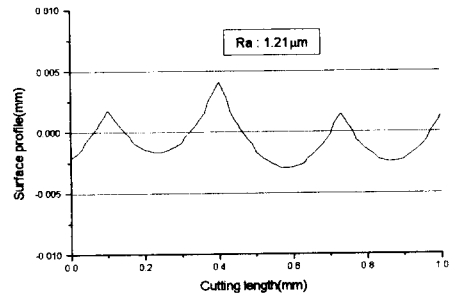


Fig. 11 Surface profile using simulation (Peak frequency : 889Hz)

Fig. 11은 Fig. 9로부터의 피크 주파수를 시뮬레이션 프로그램에 입력하여 생성한 표면 파형이다. 고주파 성분(889Hz)에 의해 회전당 이송량(0.2mm) 성분이 사라지고 0.3mm의 주기를 가지는 표면 파형을 형성하고 있으며 이는 실험에 의한 표면 형상 Fig. 10과 잘 일치한다.

이러한 결과로부터 고주파 진동에 의해 표면 파형의 주기와 거칠기 값이 큰 영향을 받을 수 있고 가공 중의 가속도 신호를 측정하여 표면 형상을 시뮬레이션하는 것이 가능한 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

고속 엔드밀 가공시 가속도계를 이용한 표면형상의 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구 설치시 발생하는 런아웃에 의해 날당 이송량이 표면파형에 미치는 영향이 사라지고 회전당 이송량에 의해 표면파형이 형성된다.
- (2) 시뮬레이션에 입력되는 피크주파수는 조화성분에 대한 비로서 나타낼수 있다.
- (3) 고주파 진동에 의해 표면 파형의 주기와 거칠기 값이 큰 영향을 받는다.
- (4) 가공 중의 가속도 신호를 측정하여 표면형상을 시뮬레이션하였다.

참고문헌

- (1) S. Smith, J. Tlustý, "Current Trends in High Speed Machining", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 119, pp.664-666, 1997
- (2) Hsi-Yung Feng, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction", ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp.461-469, 1996
- (3) S. A. Spiewak, "Analytical Modeling of Cutting Point Trajectories in Milling", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp.440-448, 1994
- (4) A. E. Bayoumi, G. Yucesan, "An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp.324-330, 1994
- (5) Tae-Il Seo, "Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in the Flat-End Milling Process", KSME International Journal, Vol. 13, No. 12, pp.918-930, 1999
- (6) 하건호, 이기용, 김정석, "고속가공시 동적모델에 의한 표면형상 예측", 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp.199-202, 1998