

고속 엔드밀 가공시 가속도 신호를 고려한 가공표면의 시뮬레이션

이기용* · 강명창** · 이득우*** · 김정석***
(2000년 5월 10일 접수)

Simulation of Machined Surface Considering Acceleration Signal in High Speed End Milling

Ki-Yong Lee, Myeong-Chang Kang, Deuk-Woo Lee and Jeong-Suk Kim

Key Words: High Speed End Milling(고속 엔드밀가공), Machined Surface(가공표면), Simulation(시뮬레이션), Vibrational Effect(진동 효과), Acceleration Signal(가속도 신호)

Abstract

To obtain precise machined surface and high productivity in machining, 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 investigators. Good agreements were obtained between simulated results and experimental results.

1. 서론

최근 생산성 및 정밀도를 향상시킬 수 있는 고속가공에 관한 관심이 고조됨에 따라 고속가공표면의 형성기구에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 인터넷의 발전 및 급속한 확산에 힘입어 가상현실기법이 점차 구체화되면서 절삭가공분야에서도 절삭데이터를 이용하여 절삭력이나 가공표면을 시뮬레이션하고자 하는 연구에 관심이 모아지고 있다.⁽¹⁾

기하학적으로 가공표면에 영향을 미치는 요인은 절삭속도, 날당 이송량, 셋팅 오차 등이 있는

데 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.^(2~7) 초기의 엔드밀 가공 시뮬레이션 모델은 완전 강체 모델(Rigid Model)로서 시뮬레이션의 기초를 이루는 기하학적 엔드밀 절삭 모델과 런아웃 모델 등을 제시하였다. 이후 유연성 모델(Flexible Model)로 발전하면서 공구치짐으로 인한 가공정밀도의 저하에 관한 연구가 이루어졌다. 강체 모델과 유연성 모델을 기반으로 동적모델(Dynamic Model)이 제시되었는데 주로 엔드밀 가공 시스템을 2자유도계로 모델링하여 진동을 예측하고자 하는 연구가 진행되었다.⁽⁸⁾ 그러나 시뮬레이션시 절삭의 다

* 회원, 부산대학교 대학원

** 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kangmc@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2361 FAX : (051)518-7207

*** 회원, 부산대학교 기계공학부/

정밀정형 및 금형가공 연구센터

양한 변수를 모두 고려하는 것이 불가능하므로 2 자유도계 진동 모델을 사용한 시뮬레이션은 한계가 있으며 이를 보완 및 개선하기 위한 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고속 엔드밀 측면 가공시 가공표면의 시뮬레이션을 위해 강체 모델, 유연성 모델, 2자유도계 진동 모델과 더불어 가공시 가속도 신호를 측정하여 이를 시뮬레이션 모델에 이용함으로써 진동 모델을 보완 및 개선하는 방법을 제시하였다. 가속도 신호는 주파수 분석을 통해 피크 진폭값이 시뮬레이션에 입력되며 피크 주파수에 해당하는 위상값이 입력되도록 구성하였다. 실험을 통해 시뮬레이션 결과와 고속 엔드밀 가공 실험에 의한 표면측정 결과를 비교하고자 한다.

2. 시뮬레이션 모델

고속 엔드밀 가공의 시뮬레이션을 위한 모델은 강체 모델, 유연성 모델, 동적모델로 구성하였으며 동적 모델은 2자유도계 진동 모델과 가속도계를 이용한 진동 모델을 병합하여 구성하였다.⁽⁸⁾ 시뮬레이션 모델의 블록선도를 Fig. 1에 나타내었다.

시뮬레이션 모델의 입력값은 절삭조건, 공구 런아웃, 공구의 유효직경, 주축계의 1차 고유진동

수로부터 계산된 모달 파라미터이며 가속도 신호는 가공 중에 측정하여 입력되도록 구성하였다. 출력되는 값은 기하학적 표면 형상, 공구 처짐, 진동 변위로서 최종 가공 표면은 이 값들을 모두 고려하여 구한다.

2.1 강체 모델

강체 모델에서는 절삭 조건과 런아웃이 입력되며 기하학적 표면 형상이 출력되도록 구성하였다. 시뮬레이션을 위해 측방향 슬라이스의 이산화와 회전시 각변위를 이산화하였으며 하향 절삭 모델로 구성하였다.

2.2 유연성 모델

유연성 모델에서는 외팔보 이론에 기초하여 유한요소해석과 정적 처짐 실험을 통해 공구의 유효직경을 구하고 모델에 입력치로 사용하였으며 공구처짐이 출력되도록 구성하였다. 본 논문에서 사용한 공구는 직경 10mm, 헬릭스각 30°, 돌출길이 30mm의 4날 엔드밀이며 물성치는 Table 1에 나타내었다. 계산된 유효직경은 8.05mm이었다.

2.3 동적 모델

동적 모델은 2자유도계 진동모델과 가속도 신호를 이용한 진동 모델로 구성하였으며 계산된 모달파라미터와 가공 중 가속도 신호를 측정하여 모델에 입력하였다. 동적 모델에서는 진동 변위가 출력되도록 구성하였다.

2.3.1 2자유도계 진동 모델

2자유도계 진동 모델에서는 주축계를 이송방향(이하 X방향)과 이송의 수직방향(이하 Y방향)에 대해 2자유도계로 모델링하고 모달 파라미터를 구하였다. 모달 파라미터는 주축계의 1차 고유진동수에서 피크피킹법(Peak Picking Method)을 사

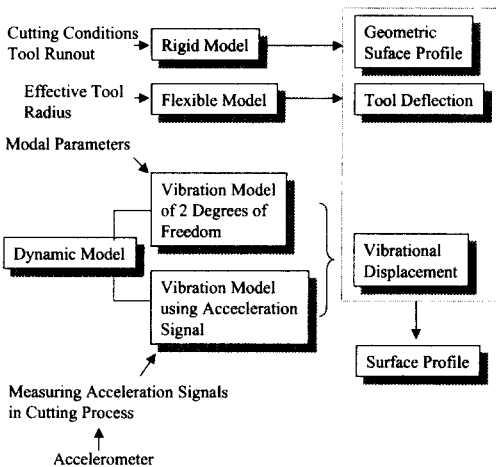


Fig. 1 Block diagram of simulation model for simulation of surface profile

Table 1 Properties of end mill and tool holder

Property	End mill	Tool holder
	WC	SM45C
Density[kg/m ³]	1.46E4	7.8E3
Young's modulus[N/m ²]	6.2E11	2.1E11
Poisson's ratio	0.28	0.29
Thermal expansion[%]	5.2E-6	1.27E-7

용하여 구하였으며 그 값을 Table 2에 나타내었다.⁹⁾

2.3.2 가속도 신호를 이용한 진동 모델

2자유도계 진동 모델에서는 절삭의 다양한 변수를 모두 고려하는 것이 불가능하므로 가공 중 가속도 신호를 측정하여 이로부터 진동을 해석하는 방법을 도입하였다.

엔드밀의 측면 가공시 이송방향 X방향에 직각 방향인 Y방향의 진동이 가공표면에 직접 영향을 미친다고 판단되므로 Y방향 가속도 신호를 측정하여 분석하였다. X방향의 진동 역시 표면에 영향을 미치지만 이는 Y방향에 비해 미미할 것으로 판단되면 그 효과는 거칠기 크기에는 거의 영향을 미치지 않으며 표면 파형의 주기에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Y방향의 진동변위 X_Y 는 식 (1)과 같이 여러 주파수의 조화함수 성분을 중첩시킨 푸리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$X_Y = X_1 \sin \omega_1 t + X_2 \sin \omega_2 t + X_3 \sin \omega_3 t + \dots \quad (1)$$

Y방향의 가속도 A_Y 는 X_Y 를 두 번 미분하여 계산된다.

$$\begin{aligned} A_Y &= -X_1 \omega_1^2 \sin \omega_1 t - X_2 \omega_2^2 \sin \omega_2 t \\ &\quad - X_3 \omega_3^2 \sin \omega_3 t + \dots \\ &= A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t + \dots \quad (2) \end{aligned}$$

따라서, 각각의 진동변위, $X_m(m=1,n)$ 은 식 (3)과 같다.

$$X_1 = -\frac{A_1}{\omega_1^2}, X_2 = -\frac{A_2}{\omega_2^2}, X_3 = -\frac{A_3}{\omega_3^2}, \dots \quad (3)$$

가공표면을 시뮬레이션 하기 위해서는 강체모델, 유연성 모델, 2자유도계 진동 모델로부터 계산된 날 끝의 Y좌표 위치에 가속도 신호를 통해 계산된 진동 변위 I_v 가 합산되어야 한다. 이때 I_v 는 식 (4)와 같이 계산될 수 있다.

$$I_v = X_1 \cdot \sin\left(\frac{60 \cdot (j + \phi_1) \cdot 2\pi f_1}{n_j \cdot N}\right)$$

Table 2 Modal parameters of spindle system

Direction	Equivalent mass[kg]	Equivalent damping[kg/s]	Equivalent stiffness[N/m]
X	21314	235405	2.97E8
Y	83493	1275510	1.05E9

$$\begin{aligned} &+ X_2 \cdot \sin\left(\frac{60 \cdot (j + \phi_2) \cdot 2\pi f_2}{n_j \cdot N}\right) \\ &+ X_3 \cdot \sin\left(\frac{60 \cdot (j + \phi_3) \cdot 2\pi f_3}{n_j \cdot N}\right) + \dots \quad (4) \end{aligned}$$

여기서, $f_1 = -\frac{\omega_1}{2\pi}, f_2 = -\frac{\omega_2}{2\pi}, f_3 = -\frac{\omega_3}{2\pi}, \dots$

j : 회전각의 증가에 따른 이산값

$\phi_m(m=1,n)$: 위상값

$f_m(m=1,n)$: 주파수

n_j : 1회전 당 j 의 개수(3600으로 이산화)

N : 주축회전수

가속도 신호를 시뮬레이션에 입력하기 위해 주파수 분석을 수행하였다. 주파수 분석시 창함수는 헨닝 윈도우(Hanning Window)를 사용하였으며 분석 후 진동 변위로 환산하기 위해 주파수 제곱으로 나눈값을 사용하였다.

2자유도계 진동 모델에서는 1차 고유진동수 이상의 고주파 영역 진동이 고려되어 있지 않으므로 회전주파수의 제2조화성분 이상의 고주파 영역을 분석하여 시뮬레이션에 입력값으로 사용하였다. Fig. 2는 가속도 신호를 시뮬레이션에 이용하는 과정을 나타내었다.

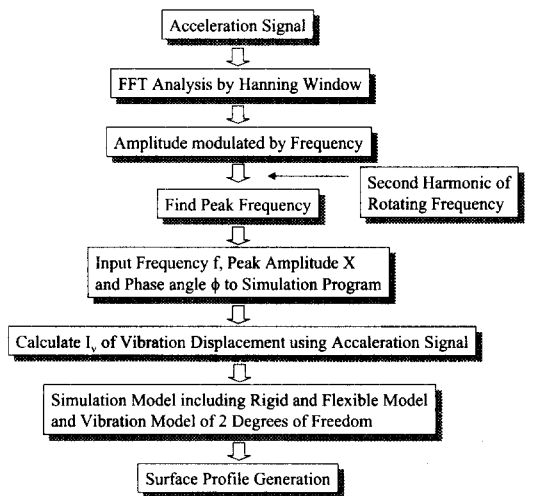


Fig. 2 Flowchart of simulation process using acceleration signal

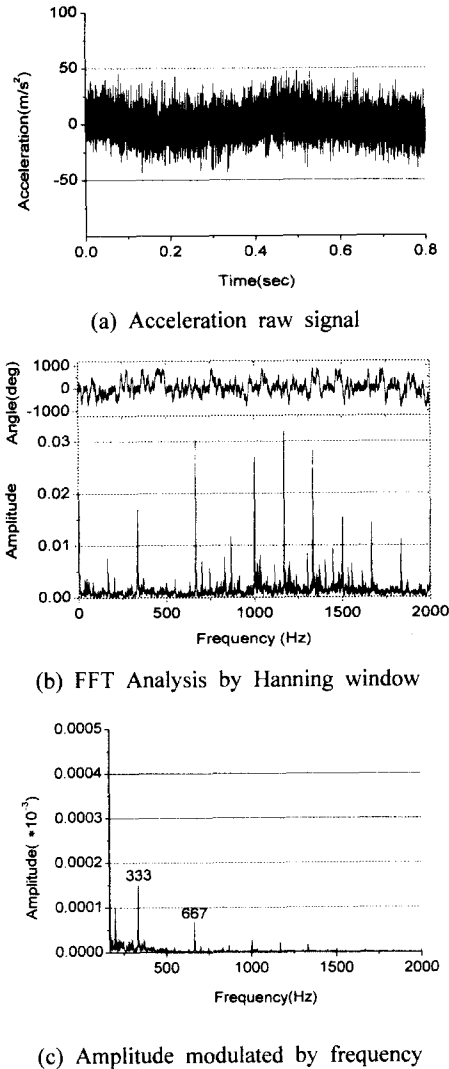


Fig. 3 Analysis process of acceleration signal

가속도 신호를 주파수 분석하고 주파수의 제곱으로 나눈 그래프를 구하는 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 변환된 그래프에서 제2조화성분 진폭의 1/2 이상인 주파수에 대한 진폭값을 구하고 이 주파수에 해당하는 위상값을 구하였다.

가속도 신호를 이용한 진동 모델의 시뮬레이션은 조화성분비, 진폭값, 위상값을 고려하여 다음과 같이 3가지 방법으로 수행하였다.

방법 #1은 각 주파수에 대한 진폭값을 제2조화성분에 대한 비로 변환하고 제2조화성분의 1/2 이상의 진폭을 시뮬레이션에 입력으로 설정한다.(Table A-1의 $X_m(m=1,n)/X_1$ 을 입력) 제2조화성분은 10000rpm의 경우 약 333Hz이며 15000rpm의

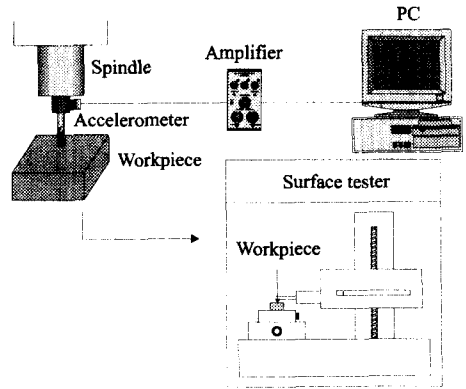


Fig. 4 Experimental setup for measuring acceleration signal

경우 500Hz에 해당된다. Fig. 3(c)의 주파수 분석 후 변환된 그래프로부터 제2조화성분의 1/2 이상의 피크를 보이는 주파수에 대한 진폭값을 구한다.

방법 #2는 조화성분의 비로 나타내지 않고 변환 그래프의 진폭값을 시뮬레이션에 입력한다.(Table A-1의 $X_m(m=1,n)$ 을 입력) 방법 #1의 경우 제2조화성분 이상의 고주파 성분이 크더라도 조화성분의 비로 입력되기 때문에 제2조화성분의 진폭값에 따라 입력되는 값은 상대적으로 작아질 수 있다. 방법 #2에서는 조화성분의 비로 나타내지 않고 변환 그래프의 진폭값을 입력함으로써 제2조화성분의 진폭값에 상관없이 고주파 성분의 진폭값이 크면 시뮬레이션에 영향을 미칠 수 있도록 하였다.

방법 #3은 방법 #2의 진폭값과 위상값을 함께 시뮬레이션에 입력하고 위상값은 제2조화성분을 기준으로 정리하여 입력한다.(Table A-1의 $X_m(m=1,n)$ 과 $\phi_m(m=1,n)$ 을 입력) 진폭값은 방법 #2와 같이 구하고 Fig. 3(b)로부터 해당주파수의 위상값을 구한다. 시뮬레이션에서는 각변위를 회전당 3600개로 이산화하였으므로 1°는 각변위 10에 해당한다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험은 고속 머시닝 센터(MAKINO V-55)에서 수행하였고, 공구는 초경엔드밀, 공작물은 금형강(STD11)을 사용하였다. 가속도계는 Fig. 4와 같이 주축에 고정하였으며 측정된 신호는 증폭기를 거쳐 PC로 저장된다.

실험은 엔드밀 측면 가공으로 수행하였으며 가속도계는 Y방향에 장착하여 신호를 측정하였다. 실험조건은 Table 3 같다.

4. 실험 및 시뮬레이션 결과와 고찰

실험을 통해 측정된 표면거칠기는 Table 4에 나타내었다.

표면거칠기는 날당 이송량이 0.02mm/tooth일 때 0.05mm/tooth일 때 보다 크게 나타났으며 반경방향 절입의 변화에는 그다지 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 측정된 가속도 신호의 진폭값과 위상값은 부록 A의 Table A.1과 같다. 제2조화성분의 1/2 이상의 진폭값을 가지는 주파수에 대해 진폭비, 진폭값, 위상값을 나타내었으며 각 번호의 실험조건은 Table 4에 명시한 바와 같다.

Table A-1의 진폭비($X_m(m=1,n)/X_1$), 진폭값($X_m(m=1,n)$), 위상값($\phi_m(m=1,n)$)을 이용하여 시뮬레이션한 표면거칠기 결과는 Table 5와 같다. 여

기서 진폭비는 제2조화성분의 진폭값에 대한 해당 주파수의 비를 나타내었다.

전체적으로 시뮬레이션값은 실험 결과보다 거칠기값이 작게 나타나는 것을 파악하였다. 이는 가속도 신호를 이용한 진동 모델에서 고려하지 못한 칩핑 등의 요인에 의한 것으로 판단된다.

표면 거칠기의 시뮬레이션 결과 방법 #3이 가장 타당한 시뮬레이션 방법으로 생각된다. 이는 방법 #1, #2가 진폭값만을 고려한 것에 비해 방법 #3은 위상값도 함께 고려하였기 때문이다. 그러나 위상값을 고려하기 위해서는 위상곡선으로부터 해당 주파수의 위상값을 추출하여야 하므로 방법 #1, #2에 비해 상대적으로 시뮬레이션 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

Fig. 5~10은 각 절삭조건에 대한 표면형상 측정 결과와 방법 #3을 통한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 절삭조건 5~7의 경우 절삭조건 3에 의한 경우인 Fig. 7과 거의 일치하는 경향을 보인다.

Table 3 Experimental condition

Workpiece	STD 11
Machine tool	Vertical high-speed machining center (Makino V55)
Spindle revolution	10000, 15000 [rpm]
Feed per tooth	0.02, 0.05 [mm/tooth]
Axial depth	10 [mm]
Radial depth	0.1~0.5 [mm]

Table 4 Measured surface roughness

Num. (#)	Cutting condition			Surface Roughness [μm]
	Spindle speed [rpm]	Feed per tooth [mm/tooth]	Radial depth [mm]	
1	10000	0.02	0.1	1.42
2	10000	0.02	0.2	1.11
3	10000	0.05	0.1	0.35
4	10000	0.05	0.2	1.32
5	10000	0.05	0.3	0.32
6	10000	0.05	0.4	0.35
7	10000	0.05	0.5	0.38
8	15000	0.02	0.1	1.23
9	15000	0.05	0.1	1.10

Table 5 Comparison of measured and simulated surface roughness

Num. (#)	Surface roughness Ra [μm]			
	Measured results	Simulated results		
		Method #1	Method #2	Method #3
1	1.42	0.665	0.894	0.939
2	1.11	0.642	0.780	0.972
3	0.35	0.251	0.252	0.252
4	1.32	1.2	1.417	1.421
5	0.32	0.255	0.256	0.256
6	0.35	0.257	0.258	0.257
7	0.38	0.263	0.264	0.262
8	1.23	0.964	1.315	1.342
9	1.1	1.499	1.214	1.053

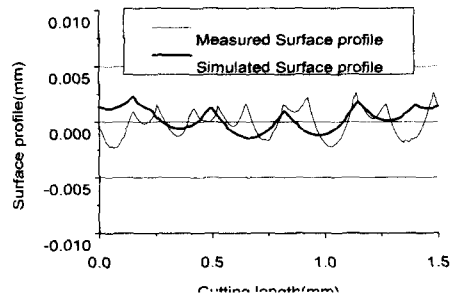


Fig. 5 Comparison of measured and simulated surface profile in cutting condition #1

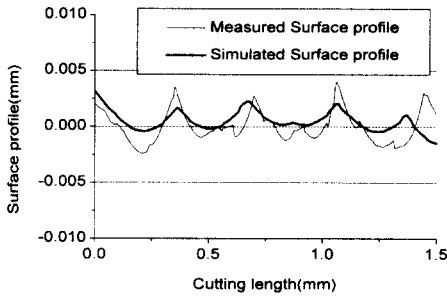


Fig. 6 Comparison of measured and simulated surface profile in cutting condition #2

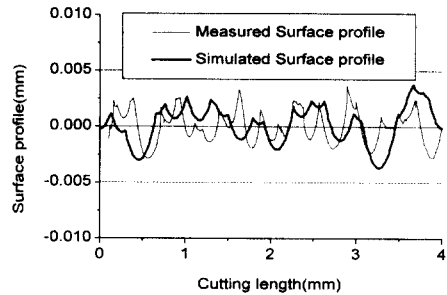


Fig. 10 Comparison of measured and simulated surface profile in cutting condition #9

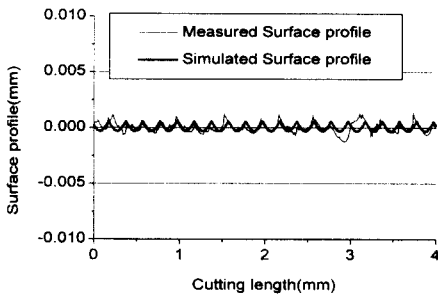


Fig. 7 Comparison of measured and simulated surface profile in cutting condition #3

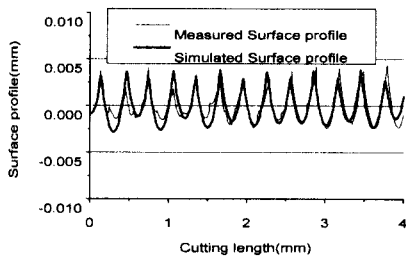


Fig. 8 Comparison of measured and simulated surface profile in cutting condition #4

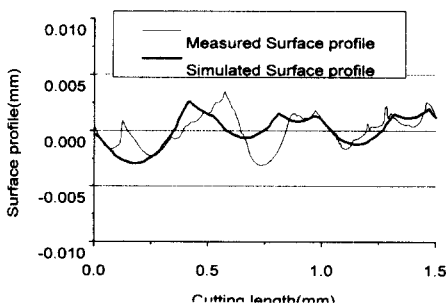


Fig. 9 Comparison of measured and simulated surface profile in cutting condition #8

Fig. 5~10으로부터 실험에 의한 표면형상 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 Fig. 7, 8의 경우 잘 일치하지만 그 외의 경우는 표면 형상이 정확히 일치하지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 본 시뮬레이션에서 고려하지 못한 칩핑, 공구의 미소한 손상 등이 주요한 원인이라고 생각된다. 또한 본 시뮬레이션에서는 회전주파수의 제2조화성분의 1/2 이상의 주파수에 대한 진폭값과 위상값만을 입력하였으므로 그 외 미소한 진동에 의한 표면형상 변화는 고려할 수 없었다. 그러나 시뮬레이션 결과를 검토하면 표면형상에 영향을 미치는 지배적인 진동은 본 시뮬레이션에서 모두 고려되었다고 판단된다.

표면거칠기와 표면형상의 시뮬레이션 결과를 검토하면 가속도 신호를 이용한 진동 모델이 2자유도계 진동 모델에서 고려하지 못한 고주파 진동 부분을 시뮬레이션에 사용하기 위한 유용한 방법으로 제시될 수 있다.

5. 결론

고속 엔드밀 가공시 가공표면을 시뮬레이션하기 위해 강체 모델, 유연성 모델, 동적 모델을 제시하였다. 동적 모델은 2자유도계 진동 모델과 가속도 신호를 이용한 진동 모델로 구성하였다.

가속도 신호를 시뮬레이션에 사용하기 위해 3가지 방법을 수행한 결과 진폭값과 위상값을 함께 고려한 방법이 가장 타당하였다. 표면거칠기를 시뮬레이션한 결과는 측정값보다 전체적으로 작지만 비교적 근사한 값을 나타내었다. 표면형상의 시뮬레이션 결과도 측정 결과와 비교적 근사하였으며 표면형상에 영향을 미치는 지배적인

진동이 가속도 신호를 이용한 진동 모델을 통해 시뮬레이션에 효과적으로 사용되었음을 확인하였다. 따라서 고속 엔드밀 가공시 가속도 신호를 이용한 진동 모델은 고주파 진동 부분을 시뮬레이션에 사용하기 위한 유용한 방법으로 제시될 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Smith S. and Tlusty J., 1997, "Current Trends in High Speed Machining," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 119, pp. 664~666.
 (2) Feng Hsi-Yung, 1996, "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.
 (3) Spiewak S. A., 1994, "Analytical Modeling of Cutting Point Trajectories in Milling," *ASME*

Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp. 440~448.
 (4) Bayoumi A. E. and Yucesan G., 1994, "An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 324~330.
 (5) Seo Tae-Il, 1999, "Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in the Flat-End Milling Process," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 12, pp. 918~930.
 (6) Kline W. A., Devor R. E. and Shareef J. R., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 104, pp. 272~278.
 (7) Shirase K. and Altintas Y., 1996, "Cutting Force and Dimensional Surface Error Generation in Peripheral Milling with Variable Pitch Helical End Mills," *International Journal of Machine Tool and Manufacturing*, Vol. 36, pp. 567~584.
 (8) 이기용, 하건호, 강명창, 이득우, 김정석, 2000, "고속 엔드밀 가공시 동적 모델에 의한 표면형상 예측," *대한기계학회 논문집*, 제21권 제7호, pp. 1681~1688.
 (9) Ewins D. J., 1986, *Modal Testing : Theory and Practice*, Brüel & Kjær Korea LTd., pp. 157~158.

부 록 A

Table A.1 Amplitude and phase values of acceleration signal

Num. (#)	f ₁ (Hz)			f ₂ (Hz)			f ₃ (Hz)			f ₄ (Hz)		
	X ₁ /X _i	X ₁ (×10 ⁻⁸)	φ ₁	X ₂ /X _i	X ₂ (×10 ⁻⁸)	φ ₂	X ₃ /X _i	X ₃ (×10 ⁻⁸)	φ ₃	X ₄ /X _i	X ₄ (×10 ⁻⁸)	φ ₄
1		333			789			872				
	1	4.774	0	1.25	5.978	-232	2.26	10.77	-123			
2		333			372			460			627	
	1	4.723	0	1.98	9.331	-240	2.19	10.34	-109	1.78	8.393	-313
3		333			667							
	1	5.277	0	0.68	3.597	287						
4		333			667			889				
	1	7.250	0	0.67	4.851	-31	1.3	9.450	5			
5		333			667							
	1	8.566	0	0.75	6.400	-7						
6		333			667							
	1	8.546	0	0.96	8.027	-79						
7		333										
	1	15.11	0									
8		500			557			715			833	
	1	1.768	0	2.97	5.304	156	3.31	5.915	17	6.72	12.00	196
9		500			664			787				
	1	4.372	0	1.2	5.233	289	1.82	7.972	-42			