

# 고속 엔드밀 가공시 동적 모델에 의한 표면형상 예측

이기용\*, 하건호\*, 강명창\*\*, 이득우\*\*\*, 김정석\*\*\*  
(1999년 7월 31일 접수)

## Prediction of Surface Topography by Dynamic Model in High Speed End Milling

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

**Key Words:** High Speed End Milling(고속 엔드밀 가공), Surface Topography(표면형상), Dynamic Model(동적모델), Tool Deflection(공구 처짐), Spindle Vibration(주축진동), Chip Thickness(칩두께), Cutting Force(절삭력)

### Abstract

A dynamic model for the prediction of surface topography in high speed end milling process is developed. In this model the effect of tool runout, tool deflection and spindle vibration were taken into account. An equivalent diameter of end mill is obtained by finite element method and tool deflection experiment. A modal parameter of machine tool is extracted by using frequency response function. The tool deflection, spindle vibration chip thickness and cutting force were calculated in dynamic cutting condition. The tooth pass is calculated at the current angular position for each point of contact between the tool and the workpiece. The new dynamic model for surface prediction are compared with several investigated model. It is shown that new dynamic model is more effective to predict surface topography than other suggested models. In high speed end milling, the tool vibration has more effect on surface topography than the tool deflection.

### 1. 서 론

최근 공작기계 성능의 향상, 공구기술의 발전, 금형 산업의 생산성 및 정밀도 향상의 요구로 인해 머시닝 센터를 중심으로 고속가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 고속가공은 알루미늄 합금과 같은 쾌삭재 가공에는 활발히 이루어지고 있으나 금형강과 같은 고경도재에의 적용은 연구초기단계이므로 가공현상이 명확히 규명되지 않은 실정이다.<sup>(1)</sup> 특히 금형가공의 경우

정형가공(Net Shape) 기술의 발달에 따라 허용공차 이내로 표면오차를 유지하면서 가공시간을 감소시킬 필요가 증대되고 있다. 이에 따라, 절삭과정을 정확히 나타냄으로써 최종 표면형상을 예측할 수 있게 하는 절삭모델을 수립할 필요가 증대되었다. 엔드밀링 공정 후 최종 표면형상에 직접적으로 영향을 미치는 인자들은 공구오차, 공구 처짐, 진동 등이 있다. 공구오차는 공구의 기하학적 형상의 특징으로부터 나타나는 것이고, 공구 처짐과 진동은 절삭력에 기인하게 된다. 따라서 엔드밀링 공정에서 절삭력과 표면형상을 예측하기 위해 많은 모델들이 개발되고 있다.<sup>(2-5)</sup>

초기의 엔드밀가공 시뮬레이션을 위한 모델로서 완전 강체 모델이 소개되었으며, 강체 모델보다 발전하여 공구와 공작물에 유연성을 부여한

\* 부산대학교 대학원

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kangmc@hyowon.pusan.ac.kr

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

\*\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공 연구센터

유연성 모델(Flexible Model)이 개발되어 공구치짐으로 인한 가공정밀도의 저하에 관한 연구가 이루어졌다.<sup>(6~8)</sup> 유연성 모델은 강체모델에 비해 공구와 공작물의 처짐이 큰 경우에도 좋은 결과를 도출하지만 고속가공에서는 가공기의 동적 거동을 고려하지 않아 고속가공에서의 표면형상을 정확히 예측할 수가 없을 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 고속 엔드밀 가공시 표면형상을 예측하기 위해 가공기의 동적 거동을 고려한 새로운 동적모델을 제시하였다. 이 모델은 강체모델, 유연성 모델을 포함하고 있을뿐만 아니라 주축진동을 고려하였으므로 고속 엔드밀 가공의 시뮬레이션에 적합한 모델이다. 모델에 사용되는 공구 유효직경은 유한요소해석을 사용하여 계산하였고 공구치짐은 유연성 모델의 외팔보 이론을 적용하여 계산하였다. 그리고 주축의 진동을 고려하기 위하여 주축을 이송방향과 이송방향의 수직방향에 대해 2자유도로 가정하였다. 주축의 여러 고유진동수들 중에서 실제 가공시 가장 큰 영향을 미치는 고유진동수를 찾기 위해 차수해석(Order Analysis)을 행하고, 피크피킹법(Peak Picking Method)을 사용하여 각 방향의 주요 모달 파라미터를 추출하였다. 시뮬레이션 프로그램은 절삭면적과 절삭력의 계산을 공구회전에 따라 반복수행함으로써 표면형상 정보를 저장해 가도록 구성하였다. 동적 모델의 검증 실험으로는 초경공구를 이용한 금형강의 고속가공시 측정된 표면형상, 기존의 강체 모델과 유연성 모델에 의해 예측된 표면형상과 비교하였다.

## 2. 동적 절삭 모델

엔드밀링 공정에서 표면형상 예측을 위한 동적 절삭 모델은 크게 기하학적 엔드밀 모델(강체 모델), 유연성 모델, 동적 모델 그리고 표면형상 생성 모델로 나누어진다. 표면형상 예측을 위한 동적 절삭 모델의 블록선도는 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.1 기하학적 엔드밀 모델

기하학적 엔드밀 모델은 많은 논문들<sup>(6~8)</sup>이 제시한바 있으며 축방향의 슬라이스 이산화 및 회전시 각변위의 이산화라는 기본적인 개념에서 벗어나지 않는다. 본 연구에서도 강체모델의 기본적인 틀에 맞게 하향절삭모델을 구성하고 회전에

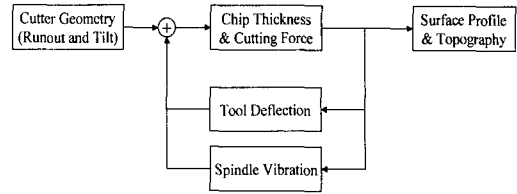


Fig. 1 Block Diagram of dynamic model for prediction of surface topography

따른 공구반경의 계산시 공구의 런아웃(Runout)과 틸팅(Tilting)을 고려하였다.

엔드밀의 임의의 한 슬라이스의 임의의 공구날에 작용하는 접선방향 힘과 반경방향 힘을 계산하기 위해 순간 절삭력이 공구날과 공작물 사이의 접촉면적에 비례하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정을 이용하여, 각위치, 슬라이스에 따른 공구날당 접선방향의 절삭력  $dF_t$ 과 반경방향의 절삭력  $dF_r$ 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} dF_t &= K_t \cdot d_z \cdot t_c \\ dF_r &= K_r \cdot dF_t \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$t_c$  : 칩두께

$d_z$  : 슬라이스의 두께

$K_t = C_t \cdot t_c^{p_t}$  : 접선방향의 비절삭저항

$K_r = C_r \cdot t_c^{p_r}$  : 반경방향의 비절삭저항

$C_t, p_t, C_r, p_r$  : 칩두께와 비절삭저항의 지수함수 상수

식 (1)을 회전변환함으로써 X-Y좌표계의 절삭력이 구해지고, 어떤 각위치에서 공구에 걸리는 합력은 절삭에 참여하는 모든 슬라이스의 각 날에 걸리는 슬라이스의 힘을 더함으로써 구해진다. 이 수치적분의 한계는 공구의 끝에서 축방향 깊이까지 혹은 날의 도입각에서 날의 도출각까지 범위가 정해진다. 각 슬라이스의 힘과 그 힘의 중심에 의해 나타나는 모멘트의 합과 각 슬라이스 힘들의 합력과 그 중심에 의한 모멘트값이 같도록 X, Y방향에서 엔드밀에 걸리는 두 힘의 축 위치는 구해진다.

### 2.2 유연성 모델

엔드밀의 유연성 모델은 외팔보 이론에 기초하였고 엔드밀의 Y방향의 처짐  $Cd_y$ 는 식 (2)와 같이 주어진다.

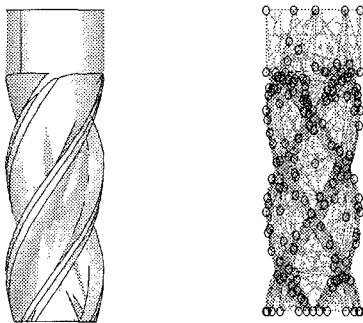
$$Cd_y = \frac{F_y}{2E RAD_e} [(CF_y - Z)^3 - (PL - Z)^3 + 3(PL - Z)^2(PL - CF_y)] \quad (2)$$

여기서,

- $F_y$  : 가해지는 힘
- $E$  : 공구의 탄성계수
- $RAD_e$  : 엔드밀의 유효반경
- $CF_y$  : 힘이 가해지는 위치
- $PL$  : 공구돌출길이(Overhang of Tool)
- $Z$  : 공구끝단으로부터의 Z방향 높이

유한요소해석과 정적 처짐 실험을 통하여 엔드밀의 유효직경을 구한다. 즉, 엔드밀의 형상 그대로 모델하여 정적 처짐을 해석하고 정적 처짐이 그 해석한 결과와 같은 범의 직경을 구한다. 본 논문에서 사용한 엔드밀은 직경 10mm, 헬릭스각 30°, 돌출길이 30mm이고 물성은 Table 1에 나타내었다. Fig. 2에는 그 모델과 요소의 구성을 나타내었다.

실험 결과, 직경 10mm, 헬릭스각 30° 인 초경합금 엔드밀의 유효직경은 8.05mm이었다.



(a) Modeling (b) Elements

Fig. 2 Modelling and element structure of end mill for FEM

Table 1 Properties of end mill and tool holder

Property	End mill	Tool holder
	WC	SM 45C
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	1.46E4	7.8E3
Young's modulus[kg/m <sup>2</sup> ]	6.327E10	2.159E10
Poisson's ratio	0.28	0.287
Thermal expansion[%]	5.2E-6	1.27E-7

### 2.3 동적 모델

고속가공시 최종 표면형상을 예측하기 위해 주축의 진동을 고려한 동적 모델을 개발하였다. 주축을 X-Y방향으로 2자유도로 가정하고, 주축의 여러 고유진동수들 중에서 실제 가공시 가장 큰 영향을 미치는 고유진동수를 찾기 위해 차수해석을 행하였으며, 그 고유진동수에서 각 방향의 주요 모달 파라미터를 추출하였다.

주축의 X-Y방향의 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = F_x(t) \quad (3)$$

$$m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = F_y(t)$$

여기서,  $m_x, c_x, k_x$  : X방향의 등가질량, 등가감쇠, 등가강성

$m_y, c_y, k_y$  : Y방향의 등가질량, 등가감쇠, 등가강성

시간간격으로 이산화하여 유한차분법을 사용하여 변위의 근사해를 구한다.

$$\ddot{x}_j \approx \frac{x_{j+1} - 2x_j + x_{j-1}}{h^2} \quad (4)$$

$$\dot{x}_j \approx \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{2h} \quad (5)$$

여기서,  $h = \frac{60}{n \cdot N_f} \left[ \frac{\text{sec}}{\text{tooth}} \right]$

$n$  : 주축의 회전수 [rpm]

$N_f$  : 공구날 수[tooth]

#### 2.3.1 엔드밀과 툴 홀더의 모드 해석

밀링공정 중의 진동을 고려한 동적 모델을 설계하기 전에, 실제 가공중의 진동에 가장 영향을 많이 주는 요소를 찾기 위해 유한요소해석툴(Pro/Engineer)을 사용하여 엔드밀, 공구 홀더(Tool Holder)의 모드 해석을 행하였다. 엔드밀의 모델과 물성은 공구처짐을 계산시에 사용한 엔드밀의 모델과 물성과 동일하다. 엔드밀만을 모드해석한 결과 1차 고유진동수가 3.009kHz이다. 이 고유진동수는 실험에 사용한 고속가공기의 최대 절삭주파수인 1.3kHz와 상당한 차이가 있으므로 실제 가공시 엔드밀의 고유진동수에 의한 영향은 없을 것을 예측된다.

공구 홀더에 엔드밀이 장착된 상태로 모드해석을 행한 경우의 모델을 Fig. 3에 나타내었다. 공구 홀더의 주축과의 접촉면을 X, Y, Z방향의 변위와 X, Y 방향의 회전을 고정시키고 Z방향의

회전은 자유롭게 하였으며 공구 홀더를 강체로 간주하였다. 모드해석 결과 1차 고유진동수가 2.118kHz이었다. 이 고유진동수 또한 가공기의 최대 절삭주파수인 1.3kHz와 상당한 차이가 있으므로 가공시 매우 안정적이라고 생각되어진다.

엔드밀을 장착한 가공기의 정지상태에서 X-Y방향으로 충격시험을 수행함으로써 구조물의 주파수 응답함수를 측정된 결과 각 방향의 고유진동수는 Table 2와 같았다. 이 때 주축의 고유진동수는 가공주파수의 범위 내에 존재하므로 가공시의 진동에 주축의 진동이 가장 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 가공중의 진동의 주요 요인을 주축의 진동으로 보고 주축을 X-Y방향으로 2자유도로 가정하고, X-Y방향 각각의 모달 파라미터를 구하였다. 주축은 다자유도계이므로 2자유도계로 가정할 때 실제 가공시 가장 지배적인 영향을 미치는 고유진동수를 찾기 위해 차수 해석을 행하였다.

2.3.2 주축의 차수 해석

주축의 회전수를 1,000rpm에서 20,000rpm까지 증가시키면서 그 각각의 응답 스펙트럼을 관찰한 결과 각 절삭주파수와 그 조화성분들의 주파수에서 피크를 가짐을 볼 수 있었으며 절삭주파수 외에 118Hz, 258Hz 그리고 450Hz에서도 서서히 증가함을 알 수 있었는데 이들이 기계의 공진주파수라 할 수 있다. Fig. 4에는 각각의 공진주파수들의 피크를 절삭주파수에 대해 나타낸 것이다. Fig. 4에 보여지는 118Hz의 1차 성분이 전체 계의 진동에 가장 많은 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서 1차 고유진동수에서 모달 파라미터를

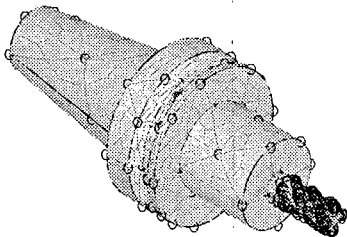


Fig. 3 Model of tool holder and end mill

Table 2 Natural frequency of spindle

Direction	1st	2nd	3th
X	118[Hz]	258[Hz]	448[Hz]
Y	112[Hz]	258[Hz]	478[Hz]

구하였다.

2.3.3 피크 피킹법에 의한 모달 파라미터 추출

피크 피킹법에서는 고유진동수( $\omega_r$ )는 주파수 응답 함수의 최대 피크 모듈에 위치하게 되고 반동력점( $r\omega_1, r\omega_2$ )은 피크 모듈의 0.707배되는 지점으로 정의되어진다. 주파수 응답 함수의 공진 영역으로부터 기초적인 데이터를 추출함으로써, 식 (6)으로부터 감쇠율  $\zeta_r$ 이 구해진다.<sup>(9)</sup>

$$\zeta_r = \frac{r\omega_2 - r\omega_1}{2\omega_r} \tag{6}$$

여기서,  $r\omega_1, r\omega_2$  : 반동력점

$\omega_r$  : 고유진동수

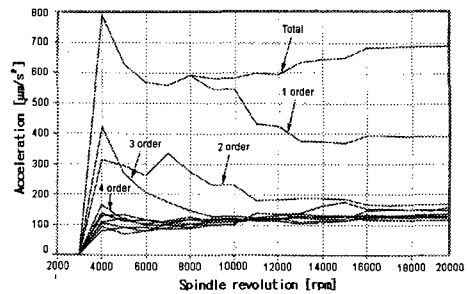
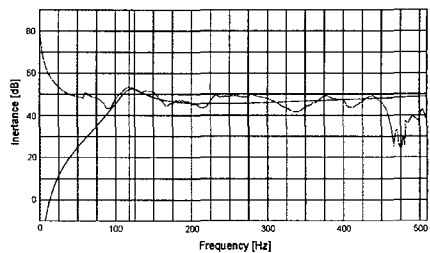
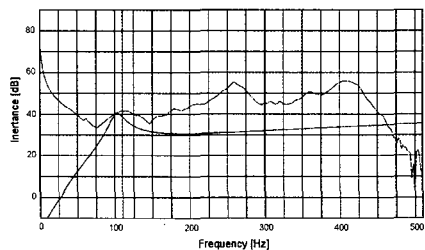


Fig. 4 Order analysis of spindle system



(a) X direction



(b) Y direction

Fig. 5 Frequency response function and peak picking results

**Table 3** Modal parameters of spindle system

Direction	Equivalent mass[kg]	Equivalent damping[kg/s]	Equivalent stiffness[N/m]
X	21313.64	235404.89	2.968E8
Y	83493.28	1275510.2	1.047E9

임팩트실험을 통하여 구한 X방향의 주파수 응답함수를 피크피킹한 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었고, Y방향의 주파수응답함수를 피크피킹한 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 식 (6)을 이용하여 구한 감쇠율은 X방향이 0.0468이고 Y방향은 0.0682이었다.

주파수 응답함수  $G$ 는 식 (7)과 같다. 구해진 감쇠율과 주파수 응답함수의 최대점의 주파수와 최대값을 이용하여 등가질량, 등가감쇠 그리고 등가강성을 구할 수 있다.

$$G = \frac{1}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (c\omega)^2}} \quad (7)$$

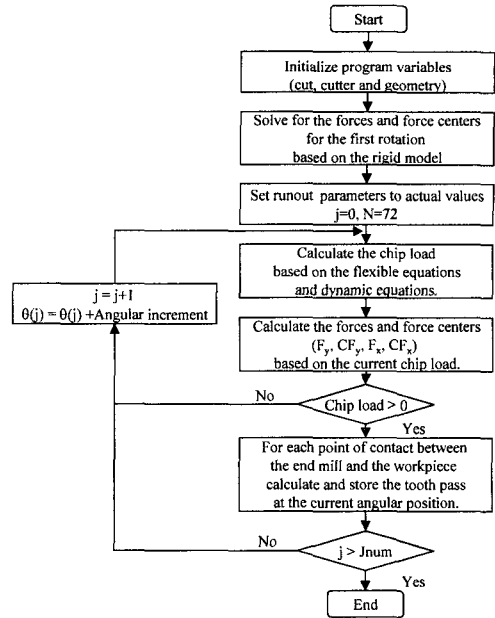
여기서,  $m, c, k$  : 등가질량, 등가감쇠, 등가강성

주축의 X방향과 Y방향의 등가질량, 등가감쇠 그리고 등가강성은 Table 3에 나타내었다.

**2.4 표면형상 생성 알고리즘**

표면형상 생성 알고리즘은 엔드밀 회전시 축방향의 슬라이스에 각 날들에 대한 칩두께를 계산하기 위해 공작물로부터 상대변위를 사용하였다. 특정 각위치에서 각 축방향의 슬라이스에 주어진 날에 대해 칩두께는 현재 관심의 공구날이 생성하는 경로와 이전에 지나간 공구날이 생성한 표출되어있는 표면과의 거리이며 요구되는 칩두께는 현재의 플루트에 의해 생성되어지는 곡선경로와 지나간 플루트에 의해 생성된 표면곡선과의 최소의 차이로 정의되어진다.

표면형상 생성 알고리즘을 Fig. 6에 나타내었다. 칩로드 계산이 처진 공구위치를 요구하기 때문에 공구의 처짐을 초기화하기 위해 첫회전이 필요하다. 첫회전 초기화가 완성되면, 런아웃 파라미터를 실제값으로 설정하고 공구의 처짐과 주축의 진동을 계산한다. 처짐과 진동은 순간 절삭력의 계산에 사용되어진다. 이와 같은 처짐과 진동의 계산과 절삭력 계산의 반복수행 과정에서, 현재 날 위치에서 칩로드가 존재할 때의 날끝의 좌표를 저장함으로써 날들의 경로를 구한다. 그



**Fig. 6** Algorithm for surface topography prediction

**Table 4** Experimental condition

Workpiece	STD 11
Machine tool	Vertical high-speed machining center (Makino V55)
Spindle revolution	2000, 6000 [rpm]
Feed per tooth	0.1 [mm/tooth]
Axial depth	10 [mm]
Radial depth	0.1 [mm]

좌표들 중에서 다음 날에 의해 다시 제거되는 부분들의 좌표들은 없애고 나머지 좌표들만 남김으로써 최종적인 표면형상을 생성할 수 있다.

**3. 실험장치 및 실험방법**

동적 모델을 검증하기 위해 사용한 실험조건은 Table 4와 같고 실험장치 구성도는 Fig. 7에 나타내었다.

공구런아웃과 틸팅을 측정하기 위해 다이얼계이지로 가공기에서 장착된 엔드밀의 끝단과 상단의 반경오차를 측정하고 기하학적 엔드밀 공구반경식을 이용하여 공구런아웃과 틸팅을 구하였다. 런아웃은 3 $\mu$ m이고 런아웃 최대 각위치는 65 $^\circ$ 이며, 틸팅각은 0.01 $^\circ$  이고 틸트 최대 각위치는 7

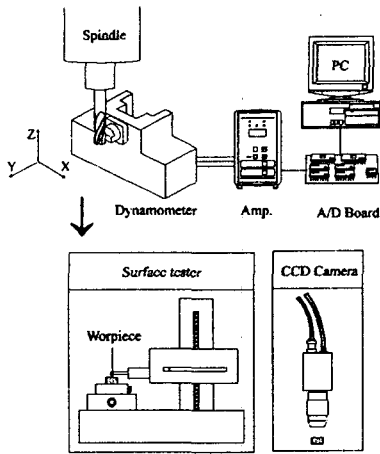
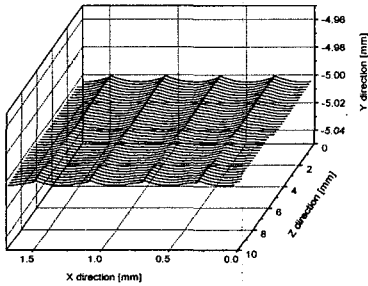
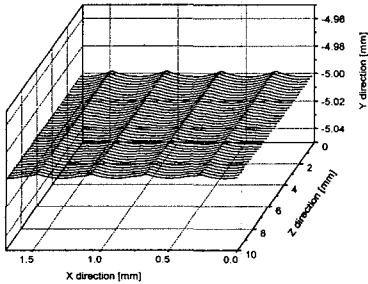


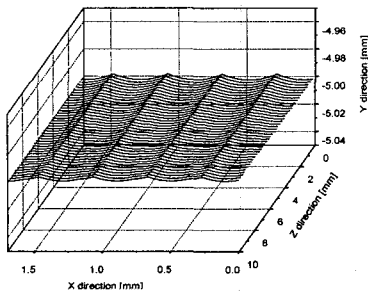
Fig. 7 Experimental setup for measuring cutting force and machined surface



(a) Predicted surface topography by rigid model



(b) Predicted surface topography by flexible model



(c) Predicted surface topography by dynamic model

Fig. 8 Simulated surface topography in 2,000rpm

0° 이었다.

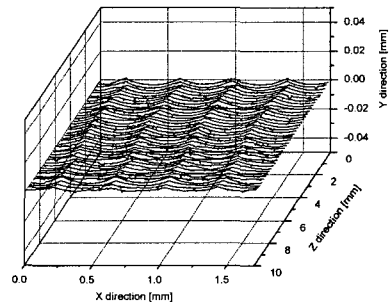
비절삭저항을 구하기 위해 축방향 절삭깊이를 0.5mm로 미소하게 두고 절삭하여 절삭력을 측정하였다. 시뮬레이션으로부터 공구런아웃 및 킬팅을 고려한 칩두께를 계산하여 최소자승법의 입력 데이터로 사용하여 비절삭저항  $C_t$ ,  $C_r$ 과 칩두께  $t_c$ 와의 관계식을 구하였다.

$$C_t = 595, p_t = -0.484$$

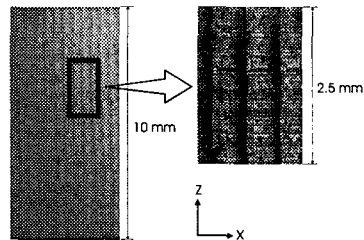
$$C_r = 135, p_r = -0.782$$

주축의 진동 특성을 파악하기 위해서 가속도계와 충격망치, 주파수 분석기(FFT)를 사용하여 주축의 주파수응답함수를 얻었다. 이때 가속도계는 주축에 부착하였고, 충격가진은 가공시에 절삭력이 가해지는 공구에 하였다.

생성표면은 축침식 형상측정기(Mitutoyo SV400)로 축방향으로 반복적으로 측정하여 데이터를 컴퓨터로 저장하고 그래픽 처리하여 3차원 형상으로 나타내었다. 표면의 변화가 심한 경우 축침식 측정기로 측정할 때 초기점의 위치가 일정하지 않기 때문에 CCD 카메라와 현미경으로 관찰하고 사진으로 표면형상의 특성을 파악하였다. 이와같이 측정된 표면형상과 강체 모델과 유연성 모델에 의해 예측된 표면형상들과 비교함으로써 동적 모델의 유용성을 검증하였다.

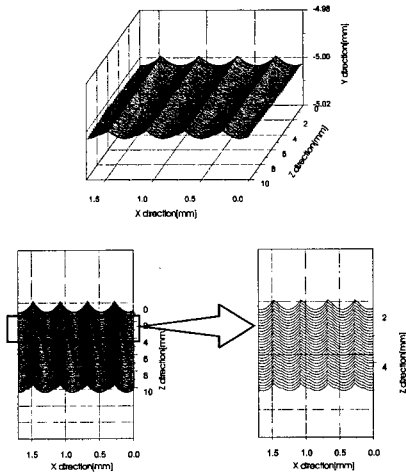


(a) Measured surface topography

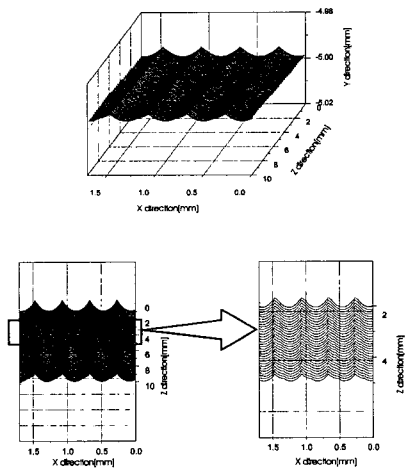


(b) Measured surface photography

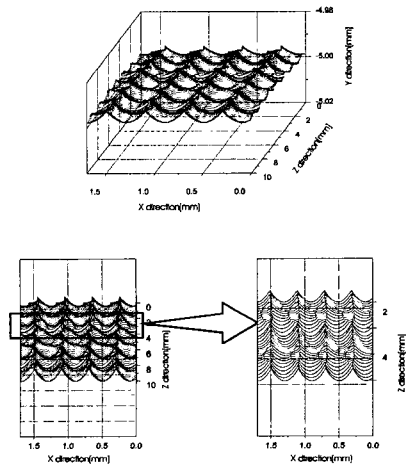
Fig. 9 Measured surface topography in 2,000rpm



(a) Predicted surface topography by rigid model



(b) Predicted surface topography by flexible model



(c) Predicted surface topography by dynamic model

Fig. 10 Simulated surface topography in 6,000rpm

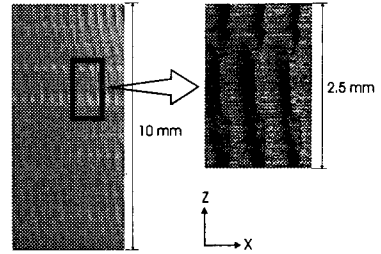


Fig. 11 Measured surface topography in 6,000rpm

#### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 주축회전수 2,000rpm, 날당이송량 0.1mm/tooth에서 시뮬레이션을 통해 구현한 표면형상을 나타내고 있다. 각각 (a)는 강체 모델, (b)는 유연성 모델, (c)는 동적 모델에 의해 예측된 표면형상을 나타내고 있다. Fig. 9는 실제 2,000rpm에서 가공시 표면형상을 나타내고 있으며 (a)에 측정기에 의해 측정된 표면형상을 나타내었고 (b)에 표면 사진을 나타내었다. 예측된 표면형상과 측정된 표면형상이 매우 잘 들어맞음을 알 수 있으며 2,000rpm의 경우에는 유연성 모델도 표면형상을 잘 예측함을 알 수 있다.

Fig. 10은 주축회전수 6,000rpm, 날당이송량 0.1mm/tooth에서 시뮬레이션을 통해 구현한 표면형상을 나타내고 있다. 각각 (a)는 강체 모델, (b)는 유연성 모델, (c)는 동적 모델에 의해 예측된 표면형상을 나타내고 있다. Fig. 11은 표면 사진을 나타내었는데 강체모델과 유연성 모델에 의한 표면형상은 측정된 표면형상과 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있다. 6,000rpm에서는 주축의 진동이 표면형상에 미치는 영향이 크기 때문이라고 생각된다. 주축이 이송방향과 이송방향의 수직방향으로 회전당의 주파수와 날 당의 주파수 그리고 각각의 조화주파수로 진동함으로써 현재의 공구날의 유효반경이 유연성 모델에서와 달라짐으로 최종표면형상이 Fig. 10에 보여지는 것처럼 변화가 많아지는 것으로 생각되어진다.

Fig. 10(c)와 Fig. 11에서 표면형상을 관찰하면 축방향으로의 이송자극 이탈 현상이 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 X, Y 축의 진동이 6000rpm에서 커짐에 따라 발생하는 것으로 동적 모델의 시뮬레이션 결과에서 표면형상의 피크값이 다른 모델처럼 곧지 않고 경사져 있는 것으로 관찰할 수 있다. 실제 가공면의 경우 이송자극

이탈현상뿐만 아니라 전체적으로 거칠기 산이 경사져 있는 것을 볼수 있으며 이는 시뮬레이션 결과와 유사하다.

실험한 결과와 시뮬레이션한 결과를 비교하여 볼 때, 2,000rpm 정도의 저속 회전수에서는 기존 유연성 모델도 표면형상을 잘 예측함을 알 수 있었다. 그러나 6,000rpm 정도의 고속 회전수로 가공할 때는 유연성 모델은 표면형상을 잘 예측할 수 없었으나 동적 모델의 경우 잘 예측하였다. 또한 공구치짐보다는 주축의 진동과 공구오차가 표면형상에 더 많은 영향을 미치는 경우 동적 모델을 사용해야 정확한 표면형상을 예측할수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

엔드밀을 이용한 고속가공시 기하학적 엔드밀 모델에 기초하여 유연성 모델과 주축의 진동을 고려한 동적모델을 결합한 새로운 동적 절삭모델을 제안하였다. 제안한 절삭모델에서 유연성 모델에 사용되는 공구유효직경은 유한요소해석을 통하여 계산하였고 동적 모델에서는 주축의 진동을 고려하기 위해 주축을 2자유도계로 가정하고 차수해석을 통해 실제 가공에 지배적인 영향을 미치는 고유진동수를 파악하였다. 주축의 모달 파라미터는 주파수 응답함수로부터 피크피킹법을 이용하여 추출하였다. 범용의 절삭속도에서는 기존 유연성 모델과 동적 모델 모두 표면형상을 잘 예측하였지만 고속에서 유연성 모델은 표면형상을 잘 예측할 수 없었고 주축의 진동을 고려한 동적 모델의 경우 잘 예측하였다. 또한 공구치짐보다는 주축의 진동과 공구오차가 표면형상에 더 많은 영향을 미치는 경우 동적 모델을 사용해야 정확한 표면형상을 예측할수 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Smith S. and Tlustý 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-II, 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) Kline W. A. and Devor R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 23:2/3, pp. 123~138.
- (8) Sutherland J. W. and Devor R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 269~279.
- (9) Ewins D. J., 1986, *Modal Testing : Theory and Practice*, Brüel & Kjær Korea LTd., pp. 157~158.