

공구 공작물간의 상대변위를 고려한 엔드밀링의 절삭공정 모델링 Cutting Process Modeling of End-Milling in a Closed-Loop Configuration

황철현*(포항공대 대학원), 조동우(포항공대)

CheolHyun Hwang*(Pohang Graduate School, Pohang Univ), DongWoo Cho(Pohang Univ)

ABSTRACT

In cutting system, relative displacement between tool and workpiece is very important. Even though there have been so many works for modeling cutting process of end-milling, most of them have considered only one displacement of either tool or workpiece instead of both. In this paper, the relative displacement between tool and workpiece is considered for modeling cutting process of end-milling using simple experimental modal analysis and cutting force simulation program is developed. In cutting force model, instantaneous uncut chip thickness model is used and Runge-Kutta method is used for the simulation of time varying cutting system.

Key Words : cutting process(절삭 공정), end-milling(엔드밀링), relative displacement(상대변위), tool(공구), workpiece(공작물), modal analysis(모드 해석), cutting force(절삭력), uncut chip thickness(비절삭 칩 두께)

1. 서론

근래 들어 공작기계 제작 기술의 발달로 인해 가공 생산성(Material Removal Rate) 향상과 고정도 가공이 가능하게 되었다. 그러나, 이를 위해서는 실제 가공에 있어서의 작업자의 경험과 숙련된 지식을 필요로 한다. 이런 문제점에 해결책을 제시해 줄 수 있는 것이 최근에 등장한 가상 공작 기계(Virtual CNC)의 개념이다. 즉, 하나의 공작기계를 통해 이루어지는 가공의 전 과정을 컴퓨터를 이용해 보여 줌으로써 실제 가공을 하지 않고도 가공 정도를 예측할 수 있도록 하는 것이다. 본 연구에서는 산업 현장에서 많이 이용되는 엔드밀 절삭 시스템을 간단히 모델링하여 가상 공작기계의 한 모듈로 이용될 수 있도록 하였다.

엔드밀 가공에 있어 정밀도에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나는 절삭력이며, 이에 대한 많은 연구가 있었다. Kline, Devor[1], Tlusty[2]등은 강체를 가정한 절삭력 모델을 제시하였고, Kline[3][4][5]등은 공구의 정적 처짐을 고려한 모델, Sutherland[6]등은 공구의 runout 을 고려한 모델을 제시하였다. 그러나, 이들 모델에서는 공구의 변위만을 고려하였고, 공작물의 거동은 반영되지 않았다.

본 연구에서는 공구와 공작물의 거동을 모두 고려하여 절삭 시스템을 모델링하였다. 간단한 모달 테스트를 통하여 공구와 공작물의 거동을 모델링하고, 이를 절삭력 모델에 반영하였다.

2. 구조 해석

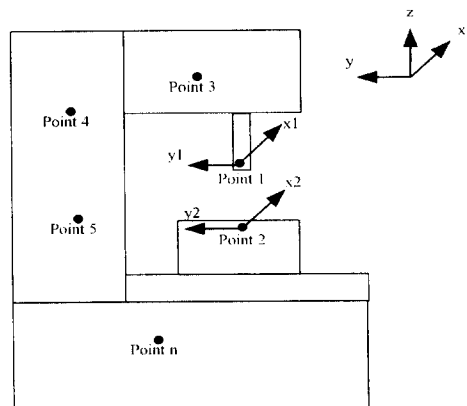


Fig. 1 머시닝센터의 자유도

Fig.1 과 같이 머시닝센터를 2n-DOF 시스템으로 간주하고 가공 시 시스템에 가해지는 힘은 point 1 과 point 2 에만 작용한다고 가정하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{y}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{y}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_n(t) \\ \ddot{y}_n(t) \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{y}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{y}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \\ \dot{y}_n(t) \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ x_2(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \\ y_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{x1}(t) \\ F_{y1}(t) \\ F_{x2}(t) \\ F_{y2}(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

절삭에 영향을 미치는 곳은 point 1 과 2 일뿐만 아니라, 나머지 point 에는 힘이 가해지지 않으므로 모드벡터를 $\{x_1, y_1, x_2, y_2\}^T$ 로 구성하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ x_2(t) \\ y_2(t) \end{Bmatrix} = q_1(t) \begin{Bmatrix} x_1(1) \\ y_1(1) \\ x_2(1) \\ y_2(1) \end{Bmatrix} + q_2(t) \begin{Bmatrix} x_1(2) \\ y_1(2) \\ x_2(2) \\ y_2(2) \end{Bmatrix} + \dots + q_m(t) \begin{Bmatrix} x_1(m) \\ y_1(m) \\ x_2(m) \\ y_2(m) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 $q_i(t)$ 는 모드좌표계 계수이고, 모드벡터는 모드 질량을 1 로 하는 벡터이다.

모달 파라미터를 구하기 위한 실험 장치는 Fig.2 와 같다. 엔드밀 가공 중 정지시켜 공구가 공작물에 닿은 상태에서 임팩트 해머로 가진한 신호와 가속도계에서 나온 신호를 FFT 의 입력으로하여 주파수 응답곡선을 얻어냈다. 가진은 x2 방향으로만 하였고, 가속도계의 반응은 x1, x2, y1, y2 모두에서 측정하였다. FFT 에서 나온 주파수 응답곡선을 fitting 하여 0~3kHz 대역에서 총 12 개의 모드와 주파수, 감쇠비들을 찾아냈다.

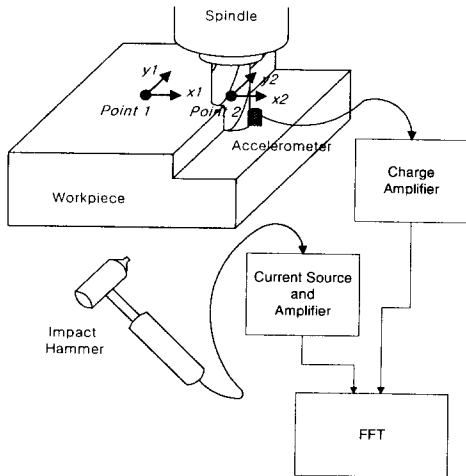


Fig. 2 모달 테스트 장치개략도

3. 절삭력 모델

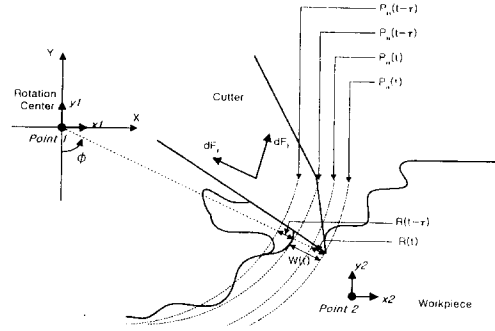


Fig. 3 공구-공작물 간 상대변위를 고려한 순간 비절삭 저항모델

엔드밀의 미소날이 절삭하는 과정을 생각하면 Fig. 3 과 같다. 공구의 변위를 $(x1, y1)$, 공작물의 변위를 $(x2, y2)$ 라하면 순간 비절삭 칩의 두께 $W(t)$ 는 다음과 같다.

$$W(t) = ft * \sin \phi + f(x1(t) - x2(t)) * \sin \phi - (y1(t) - y2(t)) * \cos \phi - f(x1(t - \tau) - x2(t - \tau)) * \sin \phi - (y1(t - \tau) - y2(t - \tau)) * \cos \phi \quad (3)$$

식(3)에서 ϕ 는 미소날의 각도 위치이고, ft 는 날당 이송량, $t - \tau$ 는 이전날의 절삭시점을 나타낸다

매순간 $W(t)$ 를 계산하고, 이를 비절삭 저항모델[1]에 적용하여 절삭 미소날에 걸리는 힘을 벡터합함으로써 순간 절삭력을 구하였다.

4. 절삭 시스템

구조 진동모델과 절삭력 모델을 이용하면 전체 절삭 공정은 다음과 같이 나타내어진다.

$$[M] \ddot{\vec{x}}(t) + [C] \dot{\vec{x}}(t) + [K] \vec{x}(t) = \vec{F}(t) = [A_t] \{ \vec{x}(t) - \vec{x}(t - \tau) \} + f_t \vec{a}_t \quad (4)$$

여기서

$$\vec{x}(t) = \{ x1(t), x2(t), y1(t), y2(t) \}^T$$

$$\vec{F}(t) = \{ F_x(t), -F_x(t), F_y(t), -F_y(t) \}^T$$

이며, $[A_t]$ 와 \vec{a}_t 는 비절삭저항 계산에 이용된 시변수 행렬과 벡터이다.

이를 block diagram 으로 나타내면 Fig. 4 와 같다.

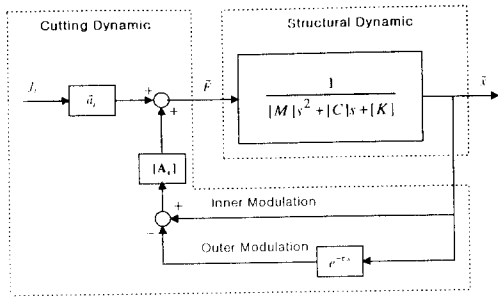


Fig. 4 전체 절삭 시스템

프로그램에서는 위의 시스템을 4-th order Runge-Kutta Method 를 이용하여 시뮬레이션하였다.

5. 실험 및 결과

비절삭 저항 계수 K_t , K_r 은 정적 처짐이나 진동이 작도록 비교적 작은 힘이 걸리는 조건에서 측정된 절삭력을 이용하였다. Runout 의 영향을 줄이기 위해 한 회전에 해당하는 절삭력들을 평균하였고 이를 강제모델[1]에 대입하여 K_t 와 K_r 을 구한 뒤, K_t 와 K_r 을 절삭속도와 날당 이송량의 함수로 가정하여 구하였다.

절삭실험에 이용된 공구는 직경 20mm, overhang 59.56mm, helix angle 30° 인 4 날 HSS 엔드밀이며, 공작물은 AI 을 이용하였다. 다양한 절삭조건에서 측정된 절삭력을 Fig. 5 와 7.에 나타내었다. 절삭력 측정은 공구동력계에서 나온 절삭력 신호를 5kHz low pass filter 를 거치 10kHz 로 sampling 하였다.

실험과 같은 조건에서의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6 과 8 에 나타내었다. 시뮬레이션에서는 절삭이 시작된 시점에서부터 절삭력이 날의 통과에 따라 일정하게 나온 후의 결과를 보이도록 하였다. 실험결과와 비교해보면 runout 이 포함되지 않았으므로 각 날들의 절삭력 파크값이 같게 나옴을 알 수 있다. 약간의 차이는 있지만 실험값을 유사하게 따라가고 있으며 특히 Fig. 8 의 경우는 비절삭 칩 두께의 변화가 실제와 거의 흡사하다.

Fig. 9 와 10 은 채터가 일어나는 강한 절삭 조건에서의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 9 는 절삭의 처음순간부터 나타난 것이고 Fig. 10 은 1 회전동안의 변화를 나타낸 것인데 공구 통과 주파수가 아닌 다른 고주파 성분이 크게 나타남을 알 수 있다.

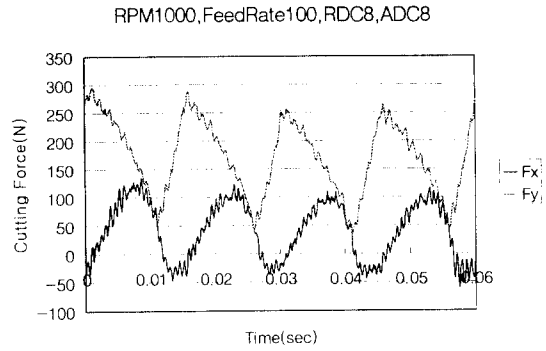


Fig. 5 측정된 절삭력 (CASE 1)

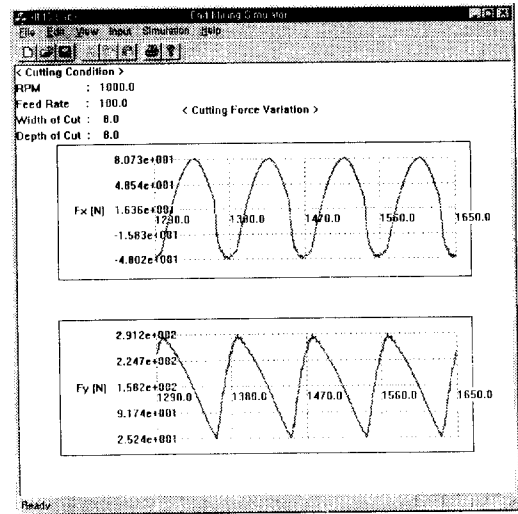


Fig. 6 시뮬레이션 결과 (CASE 1)

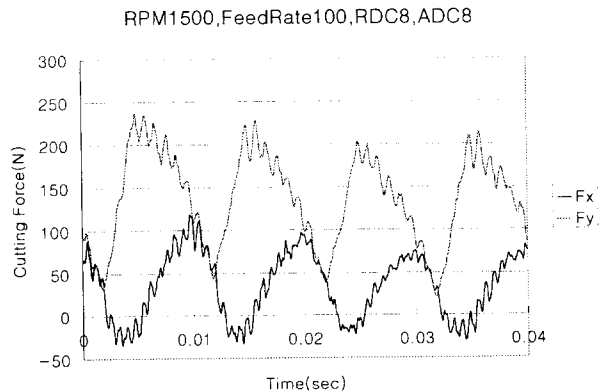


Fig. 7 측정된 절삭력 (CASE 2)

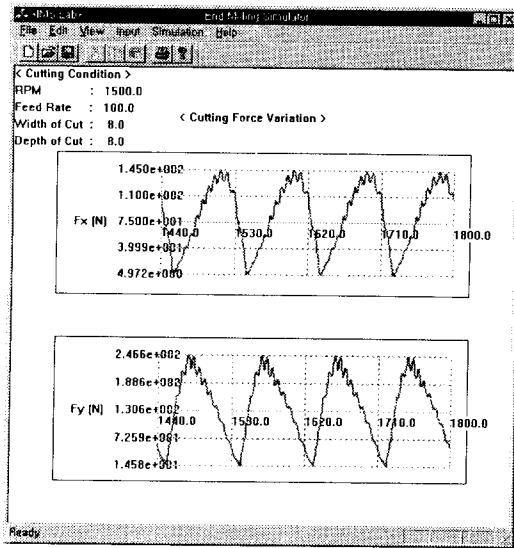


Fig. 8 시뮬레이션 결과 (CASE 2)

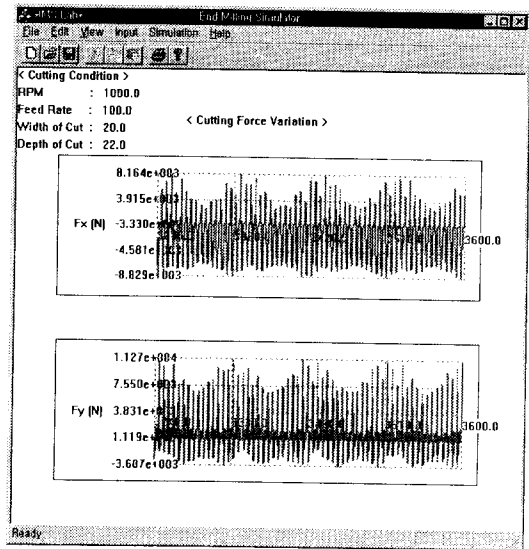


Fig. 10 시뮬레이션 결과(RPM 1000, FeedRate 100mm/min, Radial Depth of Cut 20mm, Axial Depth of Cut 22mm)

적용하여 시뮬레이션 하였다.

2. 시간영역에서 시스템의 안정성을 보여줄 수 있는 모듈을 개발하였다.

참고문헌

1. DeVor, R. E., and Kline, W. A., "A Mechanistic Model for the Force System in End Milling," Proc. of NAMRC 8, May 1980, SME.
2. Tlusty, J., and MacNeil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of the CIRP, Vol. 24, 1975.
3. Tlusty, J., "Machine Dynamics," Handbook of High Speed Machining Technology, R. I. King, ed., Chapman and Hall, New York, 1985.
4. Hann, V., "Kinetik des Schafrasens," Ph.D. Dissertation, Technischen Hochschule, Aachen, 1983.
5. Kline, W. A., DeVor, R. E. and Shareef, I. A., "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol 104, Aug. 1982, pp. 272-278.
6. Sutherland, J. W., and DeVor, R. E., "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, Nov. 1986.

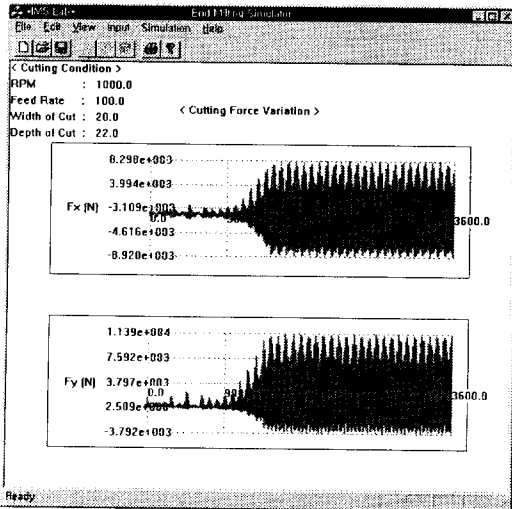


Fig. 9 시뮬레이션 결과(RPM 1000, FeedRate 100mm/min, Radial Depth of Cut 20mm, Axial Depth of Cut 22mm)

6. 결론

본 연구에서는 공구와 공작물 모두의 변위를 고려하여 절삭 공정 모델링을 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 엔드밀링 절삭 시스템은 공구 공작물 간의 상대 변위를 고려하는 것이 타당하며, 이를 위해 공구와 공작물 변위를 모두 구하여 시스템 모델링에