

CNC 가공에서 절삭력 예측과 조절을 위한 절삭 시뮬레이션 시스템 개발

고정훈*, 이한울(포항공대 대학원 기계공학과), 조동우(포항공대 기계공학과)

Development of Cutting Simulation System for Prediction and Regulation of Cutting Force in CNC Machining

J. H. Ko*, H. U. Lee, D. W. Cho(Mech. Eng. Dept., POSTECH)

ABSTRACT

This paper presents the cutting simulation system for prediction and regulation of cutting force in CNC machining. The cutting simulation system includes geometric model, cutting force model, and off-line feed rate scheduling model. ME Z-map(Moving Edge node Z-map) is constructed for cutting configuration calculation. The cutting force models using cutting-condition-independent coefficients are developed for flat-end milling and ball-end milling. The off-line feed rate scheduling model is derived from the developed cutting force model. The scheduled feed rates are automatically added to a given set of NC code, which regulates the maximum resultant cutting force to the reference force preset by an operator. The cutting simulation system can be used as an effective tool for improvement of productivity in CNC machining.

Key Words : Cutting Simulation System (절삭 시뮬레이션 시스템), ME Z-map, Cutting Force Model(절삭력 모델), Off-line Feed Rate Scheduling (이송속도 스케줄링), CNC Machining(CNC 가공)

1. 서론

CNC 가공에서 생산성 향상과 관련이 있는 이송 속도의 최적화에 대한 필요성이 점점 부각되고 있지만 아직 다양한 제품을 생산하는데 사용될 수 있을 정도의 일반적인 기술로 정립되어 있지 못하다. 그 이유는 절삭 공정에 대해 명료하게 분석되어 있지 않아서 다양한 절삭 조건에서의 가공 결과를 예측하기가 힘들기 때문이다. CNC 가공에서 최적의 절삭 조건을 산출하기 위해서는 많은 시행착오를 거쳐야 하며 그 지식은 자료화하기가 어려워 새로운 작업자의 경우 가공에 숙련되는 시간이 많이 소모된다.

최근 국내외 CAM 소프트웨어 회사에서는 절삭 조건 최적화의 한방편으로 이송 속도 최적화 방법을 도입하고 있다. 하지만 현재 대부분의 CAM 소프트웨어에서 사용하는 이송속도 최적화 방법은 피삭재와 공구간의 기하학적 관계를 고려하여 소재 제거량(MRR: material removal rate)을 일정하게 유지하는 방식이다.^{[1][2][3][4]} 그러나 MRR 을 이용하는 방식은 절삭력의 정확한 조절 및 절삭력

계수의 데이터 베이스화가 불가능하다. 같은 MRR 에서도 절삭력의 크기는 절삭 조건에 따라 상당히 다르게 나타날 수 있기 때문에 이러한 방식은 곧 경쟁력을 상실할 것으로 예측된다. 따라서 절삭력 모델을 기반으로 한 이송 속도 스케줄링의 방식이 개발되어야 하며 절삭력 모델이 정확하다면 이송 속도 스케줄링에도 효과적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 절삭력 예측 및 조절을 위한 절삭 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 절삭 시뮬레이션 시스템은 기하 시뮬레이션 모델, 절삭력 모델, 이송 속도 스케줄링 모델로 구성되어 있다. 공구와 시편 간의 접촉 영역을 해석하기 위해 ME Z-map 모델을 개발함으로써 높은 정밀도의 기하 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 사용함으로써 절삭 조건이 연속적으로 변하는 과도 절삭에서도 절삭력 예측 및 이송 속도 스케줄링의 정밀도와 효율성을 유지할 수 있다. 본 연구에서 개발된 절삭 시뮬레이션 시스템은 CNC 의 생산성을 향상시키기 위한 소프트웨어로 활용 가능하다.

2. ME Z-map 을 이용한 기하 시뮬레이션

본 연구에서는 절삭 해석에 필요한 절삭 해석 정보(cutting configuration)를 계산하기 위하여 기하 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 기존 Z-map 의 정밀도 한계를 극복하기 위하여 ME Z-map (Moving Edge node Z-map)을 개발하여 절삭 공정 시뮬레이션에 적용하였다^[5].

ME Z-map 의 기본 개념은 Fig. 1 과 같이 공구와 접촉하는 격자 점 가운데 가장 바깥쪽에 있는 점을 모서리 점(edge node)으로 정의하고, 모서리 점을 공구 궤적의 윤곽선상으로 이동시키는 것이다.

실제 시뮬레이션에서는 격자 점을 순서대로 검색하고, 격자 점이 Fig. 1(a)와 같이 공구 이동 면에서의 모서리 영역 내에 위치하면 모서리 점으로 정의한다. Fig. 1(b)는 모서리 점의 이동 후 변화된 격자 점들의 위치를 나타낸 것이며, 현재 공구 이동면 내부에 위치할 경우 내부 점으로 재정의한다.

볼 엔드밀링의 경우 디스크 요소들의 높이에 따른 반지름의 크기는 볼의 끝 부분에서는 크게 변화하지만 볼 부분과 원통 부분이 만나는 부분에서는 매우 작은 변화량을 가진다. 따라서 각 디스크

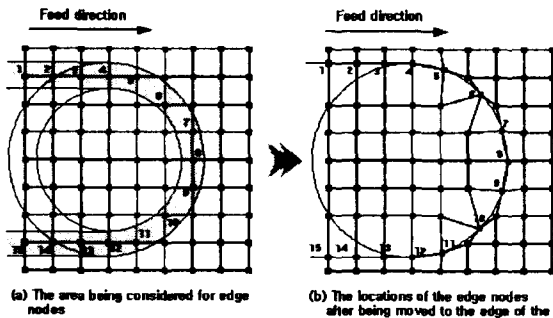


Fig. 1 The area being considered for edge nodes and the locations of the edge nodes after being moved to the edge of the swept volume in ME Z-map.

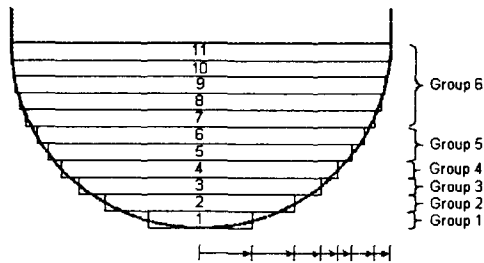


Fig. 2 Division of disk elements for cutting configuration calculation

요소에 속하는 격자 점의 위치각만을 이용할 경우 정확한 절삭 해석 정보를 계산할 수 없다. 본 연구에서는 Fig. 2 와 같이 공구의 디스크 요소를 그룹화하고 각 그룹을 바탕으로 모서리 점 정의와 이동을 구현함으로써 절삭 공정 시뮬레이션에서 가공 중의 공작물을 정밀하게 모델링하고 정확한 절삭 해석 정보를 계산할 수 있다.

3. 절삭력 모델에 기초한 이송 속도 스케줄링 모델

3.1 평 엔드 밀링의 경우

엔드 밀링 공구를 미소 디스크 요소로 분할하여 각각의 미소 디스크에서의 순간 절삭력을 계산하고 최종적으로 이를 더함으로써 임의의 공구 회전각에 대해서 절삭력을 예측할 수 있다.

Fig. 3 은 엔드 밀링 공정과 좌표계에 대한 개략도를 보여준다.

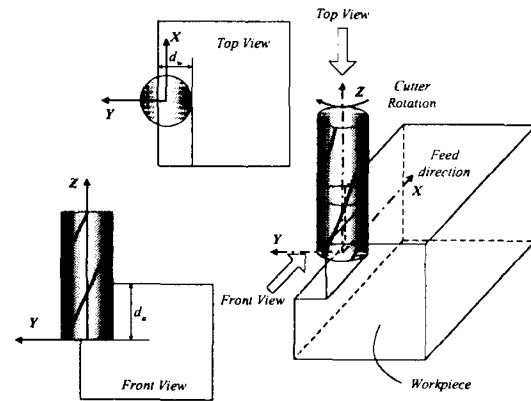


Fig. 3 Schematic views of end milling process geometry and coordinate.

본 연구에서 미 변형 칩 미 변형 칩 두께 모델은 식 (1)과 같은 모델을 사용한다.

$$t_c(\phi) = f_t \sin \phi \quad (1)$$

본 연구에서 개발된 평 엔드밀 절삭력 모델로부터 절삭력과 이송속도의 관계를 식 (2)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$\begin{aligned} F_x(j) &= f_t \left\{ \sum_k \sum_i [C_1 \cos(\phi - \alpha_r) + K_f C_3 \cos \phi \right. \\ &\quad \left. - K_f C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] K_n B_1 \sin \phi \right\} \\ &= f_t \Psi_x(j) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_y(j) = f_i \left\{ \sum_k \sum_i [C_1 \sin(\phi - \alpha_r) + K_f C_3 \sin \phi + K_f C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] K_n B_1 \sin \phi \right\} = f_i \Psi_y(j) \quad (3)$$

$$F_z(j) = f_i \left\{ \sum_k \sum_i [-C_2 + K_f C_5] K_n B_1 \sin \phi \right\} = f_i \Psi_z(j) \quad (4)$$

여기서,

$$C_1 = \cos \theta_h / \sin \theta_{ik}, \quad C_2 = \sin \theta_h / \sin \theta_{ik},$$

$$C_3 = \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{ik}),$$

$$C_4 = \cos \theta_c / \sin \theta_{ik},$$

$$C_5 = \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{ik}),$$

$$B_1 = \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h),$$

$$\cos \theta_{ik} = \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h,$$

α_r : 공구의 상면 경사각(rake angle)

Table 1 과 같이 평 엔드 밀링에서 절삭력 계수 K_n , K_f , θ_c 는 절삭 조건에 독립적인 상수로 정의된다.

Table 1. Cutting coefficients in flat-end milling

Workpiece Material	K_n (N/mm ²)	K_f	θ_c (rad.)
AL 2024-T4	6.712	0.782	0.464

임의의 절삭력 한계치에 따른 이송속도는 다음 식 같이 구할 수 있다.

$$(feedrate)_{desired} = \frac{F_{lim}}{\sqrt{\Psi_x(j)^2 + \Psi_y(j)^2}} \cdot N \cdot RPM \quad (5)$$

여기서 F_{lim} 은 사용자에게 의해 설정된 절삭력 한계치, N 은 공구의 날수, RPM 은 주축 회전 속도이다.

3.2 볼엔드밀링의 경우

볼 엔드 밀링에서 기본적 미변형 칩두께는 다음과 같이 정의하도록 한다.

$$t_c = f_i \cdot \sin \phi \cdot \cos \psi \quad (6)$$

여기서 ψ 는 공구의 진행 경사각이다. 식 (6)에서 계산된 미변형 칩두께에서 공구 축 방향 이송량에 의한 미변형 칩두께의 변화를 고려한다.

볼 엔드밀링의 절삭력 모델로부터 식 (7)과 같

은 절삭력의 최대 합력을 일정하게 유지하기 위한 이송 속도를 스케줄링한다.^[7]

$$F_{max} = \text{Max}(\sqrt{F_x(j)^2 + F_y(j)^2})_{j=1, \dots, n_0} = \text{function of } (K, t_c(\phi)) \quad (7)$$

주어진 절삭 깊이 및 절삭 속도에서 이송 속도가 증가함에 따라 최대 절삭력은 증가한다. 이를 이용하여 기존 절삭력에 해당하는 이송속도를 간단한 보간법을 통하여 찾아갈 수 있다. 임의의 이송 속도, f_1 과 f_2 에서의 절삭력의 합력의 최대값이 F_1 과 F_2 일 때 기존 절삭력 F_{ref} 로서 f_{next} 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$f_{next} = f_1 + \frac{(F_{ref} - F_1)(f_2 - f_1)}{F_2 - F_1} \quad (8)$$

여기서 F_1 과 F_2 는 f_1 과 f_2 에서의 절삭력의 최대 합력이다. f_{next} 에서 계산된 절삭력이 기존 절삭력과 다른 경우에는 f_1 , f_2 중에 f_{next} 와 보다가 가까운 점을 새로운 f_1 으로 정하고, f_{next} 를 f_2 에 대입하여 새로운 f_{next} 를 구하는 과정을 반복한다.

볼 엔드밀링에서 절삭력 계수는 다음 식들과 같이 정의된다. 본 연구에서 개발된 절삭력 계수식은 국내외의 연구 결과와 달리 절삭 조건에 독립적이어서 두 번의 보정 실험으로 절삭력 예측이 가능하다.

$$\ln(K_n) = A_1 - (A_1 - A_2)e^{-(A_3 t_{cr})^{A_4}} \quad (9)$$

$$\text{여기서, } t_{cr}(i, j, k) = \frac{t_c(i, j, k) / \cos \theta_{hl}}{ds(k) / \Delta a}$$

$$K_f = B_1 - (B_1 - B_2)e^{-(B_3 t_c)^{B_4}} \quad (10)$$

$$\theta_c - \theta_{hlc} = \frac{C_1 - C_2}{1 + (t_c / C_3)^{C_4}} + C_2 \quad (11)$$

여기서 θ_{hlc} 는 stabler's law 에 의해 칩 유동각에 영향을 주는 극부적 헬릭스각이다.

Table 2 는 알루미늄 시편에 대해 구해진 절삭력 계수를 보여준다.

Table 2. Cutting coefficients in ball-end milling

Workpiece Material	K_n (N/mm ²)	K_f	θ_c (rad.)
AL 2024-T4	A1 = 6.813	B1 = 0.959	C1 = 0.090
	A2 = 8.595	B2 = 2.914	C2 = -0.158
	A3 = 1.694	B3 = 0.714	C3 = 0.924
	A4 = 0.636	B4 = 0.789	C4 = 1.893

4. 절삭 시뮬레이션 시스템의 적용

개발된 절삭 시뮬레이션 시스템을 이용하여 실제 가공에서 이송 속도 스케줄링을 수행하였다. Fig. 4 와 같은 복잡한 시편의 형상에 대한 CNC 가공에 대하여 이송 속도 스케줄링을 시험하였다. Fig. 5 는 최대 절삭력이 350N 이 되도록 스케줄링한 이송속도를 보여주고 있다. Fig. 6 은 스케줄링된 이송 속도로 CNC 가공을 수행했을 때 절삭력이 조절되고 가공 시간이 68% 단축되는 효과를 보여준다.

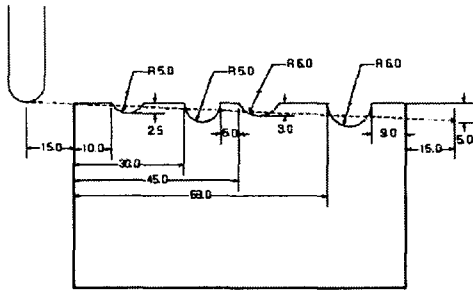


Fig. 4 Workpiece geometry in ball-end milling

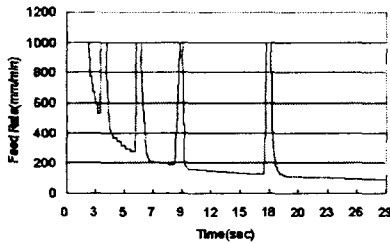


Fig. 5 The scheduled feed rate

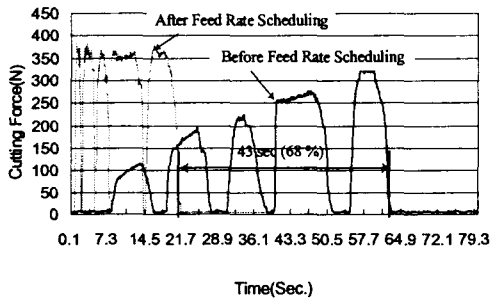


Fig. 6 Comparison of maximum cutting force before /after feedrate scheduling

5. 결론

본 연구에서는 CNC 가공에서 절삭력을 조절하기 위한 방법으로 절삭 조건 중 이송 속도를 최적

화하기 위한 절삭 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 주어진 공구 경로에 따라 절삭력 모델을 통해 절삭력을 예측할 수 있고 개발된 절삭력 모델을 기초로 하여 생산성을 향상시킬 수 있는 이송 속도를 산출할 수 있다. 본 연구를 통해 개발된 절삭 시뮬레이션 시스템은 공장 기계 사용자에게 절삭력 예측을 통한 절삭 조건의 검증 및 최적의 이송 속도를 제공해 주기 때문에 제조원가의 절감 및 다품종, 소량 체제에 대한 적응성 등 여러 가지 측면에서 유용한 도구가 될 수 있다. 또한 현재의 CAM 기술과 병합된다면 CAM 기술의 진보를 유도할 수 있고 국내 CAM 소프트웨어의 국제 경쟁력 향상에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 ㈜터보테크 주관의 2002 년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. <http://www.cgtech.com>
2. W. P. Wang, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three-dimensional NC End Milling," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 1, pp.57-65, 1988.
3. D. J. Jang, K. S. Kim, J. M. Jung, "Voxel-based Virtual Multi-axis Machining," *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, No. 10, pp. 709-713, 2000.
4. 이기우, 노상도, 신동목, 한형상, "절삭 부하 예측을 통한 NC 코드 후처리 시스템," *한국정밀공학회지*, 제 17 권, 제 5 호, pp.709-713, 2000.
5. 이한울, 고정훈, 조동우, "ME Z-map 모델을 이용한 NC 가공의 절삭력 예측," *한국정밀공학회 2002 년도 춘계학술대회 논문집*, 대전, 한밭대학교, 17-18, pp.86-89, 2002.
6. W.S. Yun and Cho, D.W., "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting Condition Independent Coefficients in End Milling," *Int. J. of Machine Tools and manufacture*, Vol.41, No. 4, pp.463-478, 2001.
7. Jeong Hoon Ko and Dong-Woo Cho, "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting-Condition-Independent Coefficients In Ball-End Milling", *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, Vol. XXX, pp. 321-328, 2002.